

|

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

**Modelování přechodových dějů při vypínání blízkých zkratů v sítích
vvn**

**Simulation of transient effects in the course of swiching off the HV
short linc faults**

Zadání diplomové práce

Student:

Bc. Jan Janák

Studijní program:

N2649 Elektrotechnika

Studijní obor:

3907T001 Elektroenergetika

Téma:

Modelování přechodových dějů při vypínání blízkých zkratů v sítích vvn
Simulation of transient effects in the course of swiching off the HV short
linc faults.

Zásady pro vypracování:

1. Rozeberte význam přechodných dějů při vypínání blízkých zkratů.
2. Definujte možnosti řešení daného problému v systému EMTP-ATP.
3. Na vybraném obvodu realizujte model obvodu pro simulaci přechodného děje.
4. Rozeberte dosažené výsledky a určete podmínky pro konkrétní aplikace.

Seznam doporučené odborné literatury:

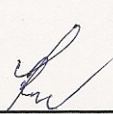
Podle pokynů vedoucího diplomové práce

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **Ing. Zdeněk Hytka, CSc.**

Datum zadání: 01.09.2013

Datum odevzdání: 07.05.2014


prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.
vedoucí katedry



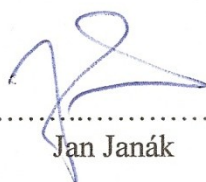

prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně.

Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

Datum odevzdání 7.5.2014


.....
Jan Janák

Poděkování

Touto cestou bych rád, poděkoval panu Ing. Hytkovi, CSc. za odborný dohled, cenné připomínky, ochotu a čas, který mi věnoval při tvorbě této diplomové práce.

Abstrakt

Zadáním diplomové práce je zpracování modelu přechodových jevů při vypínání blízkých zkratů v síti vvn. V první části teoreticky popisují jednotlivé přechodové děje od těch nejjednodušších v stejnosměrných obvodech až po ty složitější.

V druhé části jsou pojmenovány jednotlivé druhy zkratů a jejich rozdělení, samostatný oddíl patří teorii elektricky blízkému zkratu.

Třetí část je věnována programu ATP Draw, od historie vzniku až po současnost, a také jsem vytvořil a popsal model pro vypínání blízkých zkratů. V závěru diplomové práce jsou shrnuty poznatky a závěrečná zhodnocení a návrh pro konkrétní aplikaci.

Klíčové slova

Přechodný děj, elektrický blízký zkrat, síť vvn

Abstract

Goal of thesis is Simulation of transient effects during swiching off nearby short-circuits in High Voltage networks. The first part theoretical part describes different kinds of transient effects from the ones which occur in the most simple DC circuits followed by more complex examples.

Second part of thesis categorizes different kinds of short-circuits with nearby short-circuit description in standalone section.

Third part is dedicated to APT Draw software, from first releases up to most recent versions. This part also contains documentation of my model of swiching off nearby short-circuits. The conclusion of the thesis id summarizes known facts and evaluations and also included suggested real world application.

Keywords

transient effect, short-circuit, High Voltage (HV) network

SEZNAM OBRÁZKU:

OBR. 2-1STEJNOSMĚRNÝ OBVOD RL[1]	10
OBR. 2-2PRŮBĚH PROUDU PŘI ZAPÍNÁNÍ STEJNOSMĚRNÉHO OBVODU[1]	11
OBR.2-3 STEJNOSMĚRNÝ OBVOD[1]	11
OBR. 2-4TLUMENĚ KMITAVÝ PRŮBĚH[1]	13
OBR. 2-5APERIODICKÝ NARŮSTAJÍCÍ ZOTAVENÉ NAPĚTÍ[1]	15
OBR. 2-6STŘÍDAVÝ RL OBVOD[1]	16
OBR. 2-7ZAPÍNAČÍ PROUD STŘÍDAVÉHO OBVODU[1]	17
OBR. 2-8MAXIMÁLNÍ PROUD PŘI ZAPÍNÁNÍ (NEJHORŠÍ MOŽNÝ STAV)[1]	18
OBR. 2-9PRŮBĚH PROUDU A NAPĚTÍ NA KONTAKTECH PŘI VYPÍNÁNÍ STŘÍDAVÝCH RYZE OHMICKÝCH OBVODŮ[1]	19
OBR. 2-10PRŮBĚH PROUDU NA KONTAKTECH PŘI VYPÍNÁNÍ OBVODU S INDUKČNOSTÍ[1]	20
OBR. 2-11SÉRIOVÝ OBVOD RLC[1]	21
OBR.2-12 TLUMENĚ KMITAVÝ PRŮBĚH PŘECHODNÉ SLOŽKY[1]	22
OBR.2-13 APERIODICKÁ PŘECHODNÁ SLOŽKA[1]	22
OBR.2-14 PARALELNÍ OBVOD RLC[1]	23
OBR.2-15 ZJEDNODUŠENÝ PARALELNÍ OBVOD RLC[1]	23
OBR. 3-1DRUHY ZKRATŮ A) TŘÍFÁZOVÝ, B) DVOUFÁZOVÝ, C) DVOUFÁZOVÝ ZEMNÍ, D) JEDNOFÁZOVÝ[4]	25
OBR. 3-2PRŮBĚH ZKRATOVÉHO PROUDU PŘI ELEKTRICKY VZDÁLENÉM ZKRATU[4]	26
OBR. 3-3NÁHR. SCHÉMA VENKOVNÍHO VEDENÍ A DIAGRAM ROZLOŽENÍ NAPĚTÍ PODÉL CELÉHO VEDENÍ V OKAMŽIKU ZKRATU [1]	27
OBR.3-4 PRŮBĚH VSTUPNÍHO NAPĚTÍ VÝSLEDNOU VLNOU ROZLOŽENOU NA JEJÍ SLOŽKY [1]	28
OBR.3-5 PRŮBĚH NAPĚTÍ NA KONTAKTU A PO PŘERUŠENÍ PROUDU [1]	29
OBR.3-6 VÝSLEDNÉ NAPĚTÍ MEZI KONTAKTY VYPÍNAČE[1]	30
OBR.4-1 ÚVODNÍ OBRAZOVKA PROGRAMU ATP DRAW	32
OBR.4-2 MODEL ZAPÍNÁNÍ STEJNOSMĚRNÉHO OBVODU V PROGRAMU ATP DRAW	33
OBR.4-3 MODEL VYPÍNÁNÍ STEJNOSMĚRNÉHO OBVODU V PROGRAMU ATP DRAW	34
OBR.4-4 PRVKY PRO MODEL VYPÍNÁNÍ BLÍZKÉHO ZKRATU	36
OBR.4-5 KARTA NASTAVENÍ ZDROJE	37
OBR.4-6 KARTA NASTAVENÍ R PRVKU	38
OBR.4-7 KARTA NASTAVENÍ L PRVKU	38
OBR.4-8 KARTA NASTAVENÍ C PRVKU	39
OBR.4-9 ROZMÍSTĚNÍ VODIČŮ NA STOŽÁRU 110KV [8]	39
OBR.4-10 DIALOGOVÉ OKNO ZÁLOŽKA MODEL	40
OBR.4-11 DIALOGOVÉ OKNO S NASTAVENÍM PRO VEDENÍ, ZÁLOŽKA DATA	41
OBR.4-12 OBVOD PRO MODELOVÁNÍ PŘECHODNÝCH DĚJŮ PŘI VYPÍNÁNÍ BLÍZKÉHO ZKRATU	41

SEZNAM GRAFŮ:

GRAF 4-1 PRŮBĚH PROUDU PŘI ZAPÍNÁNÍ STEJNOSMĚRNÉHO OBVODU	33
GRAF 4-2 PRŮBĚH NAPĚTÍ PŘI VYPÍNÁNÍ STEJNOMĚRNÉHO OBVODU TLUMENĚ KMITAVÝ PRŮBĚH	35
GRAF 4-3 PRŮBĚH NAPĚTÍ PŘI VYPÍNÁNÍ STEJNOSMĚRNÉHO OBVODU APERIODICKÝ PRŮBĚH	35
GRAF 5-1 PRŮBĚH NAPĚTÍ NA KONTAKTECH VYPÍNAČE	43
GRAF 5-2 PRŮBĚH NAPĚTÍ NA KONTAKTECH DETAIL	43

Seznam použitých symbolů a zkratek:

Značka	Jednotka	Popis
C	[F]	Kapacita
c	[m.s ⁻¹]	Rychlost světla
f	[Hz]	Frekvence
I	[A]	Elektrický proud
L	[H]	Indukčnost
l	[m]	Délka
R	[Ω]	Odpor
t	[s]	Čas
T	[s]	Perioda
U	[V]	Elektrické napětí
v	[m.s ⁻¹]	Rychlost
α, κ	[°]	Úhel
τ	[s]	Časová konstanta
ω	[rad.s ⁻¹]	Úhlová frekvence

Zkratka	Popis
A	Kontakt vypínače
B	Kontakt vypínače
ČSN	Česká státní norma
EN	Evropská norma
obr.	obrázek
tj.	to je

Ostatní symboly a zkratky se vyskytují v textu s okamžitým vysvětlením.

Obsah

1	Úvod.....	8
2	Přechodné děje	9
2.1	Spínací přístroje.....	9
2.1.1	Poloha vypnutá.....	9
2.1.2	Vypínání.....	9
2.2	Přechodové děje stejnosměrných obvodů.....	10
2.2.1	Zapínání stejnosměrných obvodů	10
2.2.2	Vypínání stejnosměrných obvodů.....	11
2.3	Přechodové děje střídavých obvodů	16
2.3.1	Zapínání střídavých obvodů.....	16
2.3.2	Vypínání střídavých obvodů	19
3	Zkrat	25
3.1	Rozdělení zkratů	25
3.2	Elektrický vzdálený zkrat	26
3.3	Elektricky blízký zkrat.....	26
4	Modelování v programu ATP Draw.....	32
4.1	Program ATP Draw	32
4.2	Práce s programem ATP Draw	33
4.3	Model zapínání stejnosměrného elektrického obvodu	33
4.4	Model vypínání stejnosměrného elektrického obvodu	34
4.5	Model vypínání blízkého zkratu	36
5	Rozbor dosažených hodnot	42
6	Závěr.....	44
7	Literatura	45

1 Úvod

V této diplomové práci se budeme zabývat přechodovými jevy se zaměřením na elektricky blízký zkrat. Na úvod si objasníme přechodové děje. Teoreticky si popíšeme zapínání a vypínání stejnosměrných i střídavých obvodů.

V další kapitole si popíšeme jednotlivé druhy zkratů, a detailněji se budeme věnovat elektricky blízkému zkratu. Popíšeme si průběh napětí na kontaktech vypínače po vypnutí zdroje od sítě po blízkém zkratu, a také si popíšeme rizika takového vypnutí.

V závěrečných kapitolách se budeme věnovat simulaci modelu v programu ATP Draw. Nejprve si něco řekneme o historii programu ATP Draw, poté si na ukázkou namodelujeme přechodné děje při zapínání a vypínání stejnosměrného obvodu. A na to už začneme modelovat obvod pro vypínání blízkého zkratu, kde si popíšeme detailněji nastavení jednotlivých prvků v programu ATP Draw. Posléze zhodnotíme výsledky a navrhneme podmínky pro konkrétní aplikace.

2 Přechodné děje

Při zapínání a vypínání elektrického proudu v obvodu dochází ke vzniku přechodných jevů, které jsou důsledkem interakce vypínače a obvodu. Aby bylo možné tyto jevy analyzovat, je nutné se především seznámit s vlastnostmi obvodů. Za tím účelem musíme skutečný obvod (sít') zaměnit obvodem náhradním, který je ve většině případů jednodušší.[1]

Na každý skutečný obvod (sít') se můžeme dívat jako na určité pospojování rezistorů, induktorů a kapacitátorů, charakterizované tím, že tyto členy jsou rozloženy po celém obvodu. Rozložení může být různé a je jedním z rozhodujících činitelů určujících vlastnosti obvodu a charakter přechodných jevů.[1]

2.1 Spínací přístroje

Základním úkolem spínacího přístroje je uzavírat a přerušovat elektrický obvod. Z toho plyne, že vypínač má dva statické stavy:

- a) polohu vypnuto ($I = 0$; $U_{kont} = V$)
- b) polohu zapnuto ($I = I_{nom}$; $U_{kont} = 0$)

Vlastním úkolem spínače není přenos trvalého proudu nebo oddělování části vedení s napětím, ale provedení přechodu z jednoho do druhého. Tak se u vypínače objevují dva další funkční stavy, které můžeme charakterizovat jako dynamické:

- a) zapínání ($0 \rightarrow I$)
- b) vypínání ($I \rightarrow 0$)

2.1.1 Poloha vypnutá

Vypínač představuje spolehlivé přerušení vedení. Proud $I = 0$; na kontaktech vypínače je soustředěno plné provozní napětí zdroje. Izolační vzdálenost mezi kontakty musí být taková, aby za normálních stavů vedení nedošlo k porušení dielektrické pevnosti ani prostředí mezi kontakty, ani mezi částmi vypínače, které jsou pod napětím a uzemněnou kostrou. Všechny části pod napětím musí být dostatečně vzdáleny od míst a součástí, kterých se mohou dotknout osoby. Kovové součásti, se kterými mohou osoby přijít do kontaktu, musí být spolehlivě uzemněny.[1]

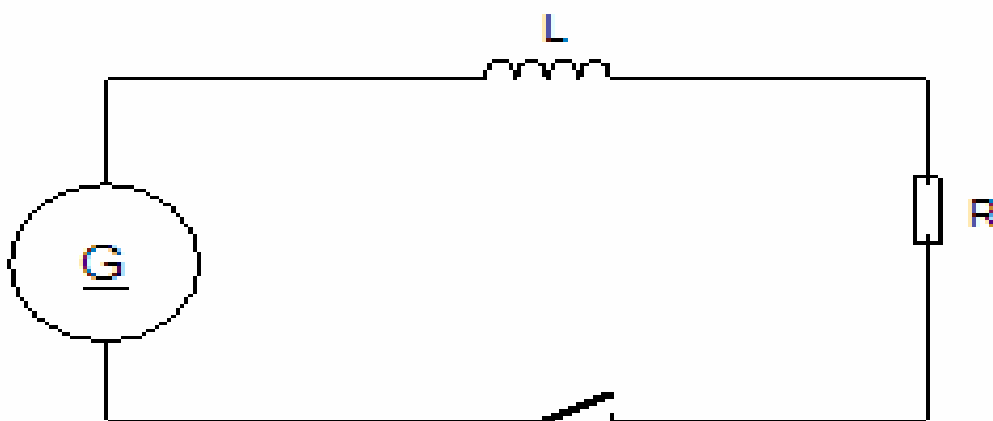
2.1.2 Vypínání

Při vypínání uvedeme v pohyb pohyblivý kontakt přístroje a to buď přímo rukou nebo pomocí pohonného mechanismu a přesuneme je z polohy zapnuto do polohy vypnuté, kdy se kontakty oddálí na dostatečnou vzdálenost.

Přerušení proudu znamená násilnou změnu ustáleného energetického toku. Tok se podle zákona akce a reakce brání. Výsledným jevem jest v silnoproudém obvodu oblouk, tj. druh elektrického výboje v plynech, který způsobí, že proud se nepřeruší v okamžiku oddálení kontaktů, ale protéká i po jejich oddálení. Je to umožněno tím, že elektrické pole mezi oddalujícími se kontakty ionizuje plynné či kapalně prostředí do takové míry, že se mezi kontakty vytvoří vodivé spojení. Definitivní přerušení nastane až po uhasnutí oblouku a obnovení dielektrické pevnosti mezi kontakty.[1]

2.2 Přechodové děje stejnosměrných obvodů

2.2.1 Zapínání stejnosměrných obvodů



obr. 2-1 Stejnosměrný obvod RL[1]

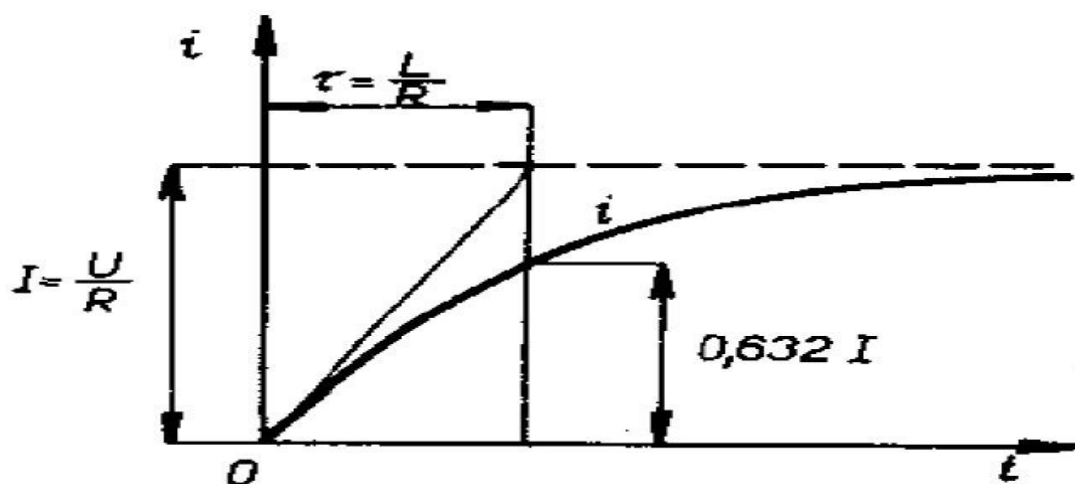
Proud ve stejnosměrném obvodu narůstá exponenciálně k ustálené hodnotě $I = U/R$ s časovou konstantou $\tau = L/R$

Průběh proudu odpovídá diferenciální rovnici:

$$L \cdot \frac{di}{dt} + Ri = u \quad (2.1)[1]$$

Pokud aplikujeme Laplaceovu transformaci na diferenciální rovnici (2.1), dostaneme výsledný proud ve tvaru:

$$i = \frac{U}{R} \cdot \left(1 - e^{-\frac{R}{L}t}\right) \quad (2.2)[1]$$



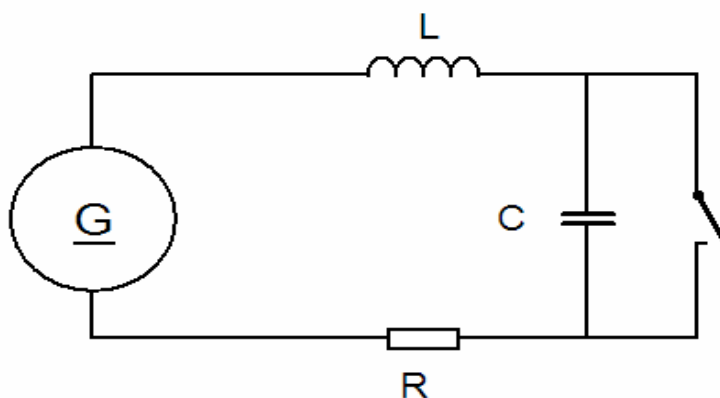
obr. 2-2 Průběh proudu při zapínání stejnosměrného obvodu[1]

2.2.2 Vypínání stejnosměrných obvodů

Uvažujeme-li o idealizovaném případě vypínání, kdy ihned při oddálení kontaktů v obvodu s indukčností přestává téci proud, jednalo by se o změnu napětí i proudu skokem. Za této situace nemůžeme ani teoreticky uvažovat o přerušení obvodu, neboť:

- a) energie v indukčnostech nedovolí náhlý pokles proudu bez průvodních jevů
- b) v případě výboje není možné dielektrické zotavení dráhy (strmost nárůstu napětí mezi kontakty je nekonečná a tudíž nulový čas pro rekombinační pochody)

Rozdíl tohoto případu oproti jevům při zapínání je ten, že jsme neuvažovali o existenci kapacity vedení, kterou podobně jako ohmický odpor a indukčnost musí každý obvod nutně obsahovat. Vliv kapacity na proud obvodu při jeho zapojení na zdroj je nulový, neboť sepnutím kontaktů je spojen nakrátko. Proto jsme o ní při studiu jevů zapínání neuvažovali. Při vypínání naopak hraje tato kapacita, kterou ve zjednodušeném schématu zaznamenáváme, jako paralelní přemostění spínače viz obr.2-3, významnou úlohu.[1]



obr.2-3 stejnosměrný obvod[1]

Pokud je spínač sepnut, kapacita je jím spojena nakrátko, při rozepnutí spínače, tj. v čase $t = 0$, připneme kapacitu na plné napětí zdroje. Protože kapacita je stále paralelně připojena ke spínači, je tedy průběh napětí na kontaktech dán průběhem napětí na kapacitě, která až do času $t = 0$ byla bez náboje a která se nyní nabíjí. Platí tedy $u_{konst} = 0, u_{c(t=0)} = 0$. Obvod je dán rovnicemi:

$$U = L \cdot \frac{di}{dt} + Ri + u_c \quad (2.3)[1]$$

$$u_c = \frac{1}{C} \cdot \int i t \quad (2.4)[1]$$

$$i = C \cdot \frac{du_c}{dt} \quad (2.5)[1]$$

Po dosazení:

$$LC \cdot \frac{d^2 u_c}{dt^2} + RC \cdot \frac{du_c}{dt} + u_c = U \quad (2.6)[1]$$

Zavedeme operátorové označení $\xi u_c = u_c$. Protože jest $u_{c(t=0)} = 0$, tj. obrazem uvedené rovnice výraz:

$$p^2 LC u_c + p RC u_c + u_c = \frac{U}{p} \quad (2.7)[1]$$

Odtud:

$$u_c = \frac{U}{p(p^2 LC + p RC + 1)} = \frac{M(p)}{N(p)} \quad (2.8)[1]$$

Dále:

$$p_1 = 0, p_{2,3} = -\frac{R}{2L} \pm \sqrt{\frac{R^2}{4L^2} - \frac{1}{LC}} = -\alpha \pm \sqrt{\alpha^2 - \beta^2} \quad (2.9)[1]$$

$$N^l(p) = 3p^2 LC + 2p RC + 1 \quad (2.10)[1]$$

Budeme uvažovat nejprve případ, že $R \ll L$, takže $\beta^2 > \alpha^2$ a druhý a třetí kořen rovnice $N(p) = 0$ jsou komplexně sdružené:

$$p_{2,3} = -\alpha \pm j\sqrt{\beta^2 - \alpha^2} = -\alpha \pm j\omega_0 \quad (2.11)[1]$$

$$\alpha = \frac{R}{2L} \quad (2.12)[1]$$

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}} \quad (2.13)[1]$$

Dosadíme do rozvojového vzorce:

$$u_c = U + \frac{U \cdot e^{(-\alpha + j\omega_0)t}}{3LC \cdot (-\alpha + j\omega_0)^2 + 2RC(-\alpha + j\omega_0) + 1} + \frac{U \cdot e^{(-\alpha - j\omega_0)t}}{3LC \cdot (-\alpha - j\omega_0)^2 + 2RC(-\alpha - j\omega_0) + 1} \quad (2.14)[1]$$

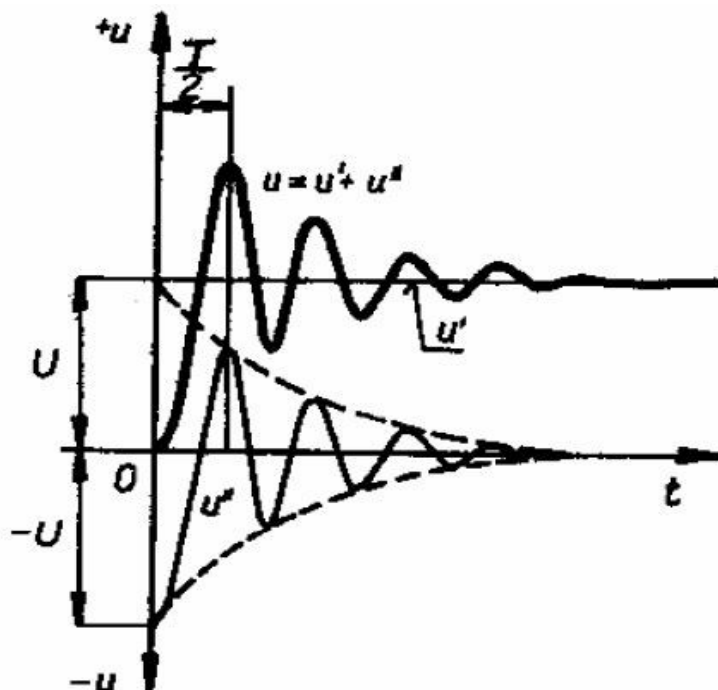
Po matematické úpravě rovnic dostaneme:

$$u_c = U \cdot \left[1 - \left(\frac{\alpha}{\omega_0} \cdot \sin \omega_0 t + \cos \omega_0 t \right) \cdot e^{-\alpha t} \right] \quad (2.15)[1]$$

Z výsledného vztahu plyne, že průběh napětí na kontaktech je dán jako součet složky ustálené (2.16) a složky přechodné (2.17), která má tlumeně kmitavý průběh viz **obr. 2-4**

$$u_c^I = U \quad (2.16)[1]$$

$$u_c^{II} = -U \cdot \left(\frac{\alpha}{\omega_0} \cdot \sin \omega_0 t + \cos \omega_0 t \right) \cdot e^{-\alpha t} \quad (2.17)[1]$$



obr. 2-4 Tlumeně kmitavý průběh[1]

Její počáteční hodnota $u_{c(0)}^{\parallel} = -U$ má stejnou velikost jako složka ustálená, je ale opačného znaménka, aby $u_{c(0)} = 0$. Napětí mezi kontakty nabíhá kmitavě do ustálené hodnoty $u_{c\infty} = U$. Není tedy ve skutečnosti nárůst čela napětí mezi kontakty, které nazýváme napětím zotaveným, nekonečně rychlý, ale narůstá určitou konečnou rychlostí, danou vlastním kmitočtem vypínaného obvodu:

$$f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}} \quad (2.18)[1]$$

Je-li $R \ll L$, lze druhý člen pod odmocninou zanedbat a výraz se ztotožní s Thompsonovým vzorcem pro rezonanční kmitočet obvodu LC:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2.19)[1]$$

Druhý faktor, který určuje strmost nárůstu zotaveného napětí, je hodnota amplitudy prvního kmitu. Je-li kmitočet značně vysoký, je doba první půlperrody krátká

$$\frac{1}{2}T = \frac{1}{2f_0} \quad (2.20)[1]$$

útlum lze zanedbat a uvažovat, že zotavené napětí překmitne na dvojnásobek napětí zdroje, tj. $2U$, neboť pak

$$u_c = U(1 - \cos \omega_0 t) \quad (2.21)[1]$$

- 1) Uvažujme nyní druhou možnost, tj. že druhý a třetí kořen rovnice $N_{(p)} = 0$, jsou reálně různé:

$$p_1 = 0 \quad (2.22)[1]$$

$$p_{2,3} = -\alpha \pm \sqrt{\alpha^2 - \beta^2} = -\alpha \pm \delta \quad (2.23)[1]$$

$$\alpha = \frac{R}{LC} \quad (2.24)[1]$$

$$\delta = \sqrt{\frac{R^2}{4L^2} - \frac{1}{LC}} \quad (2.25)[1]$$

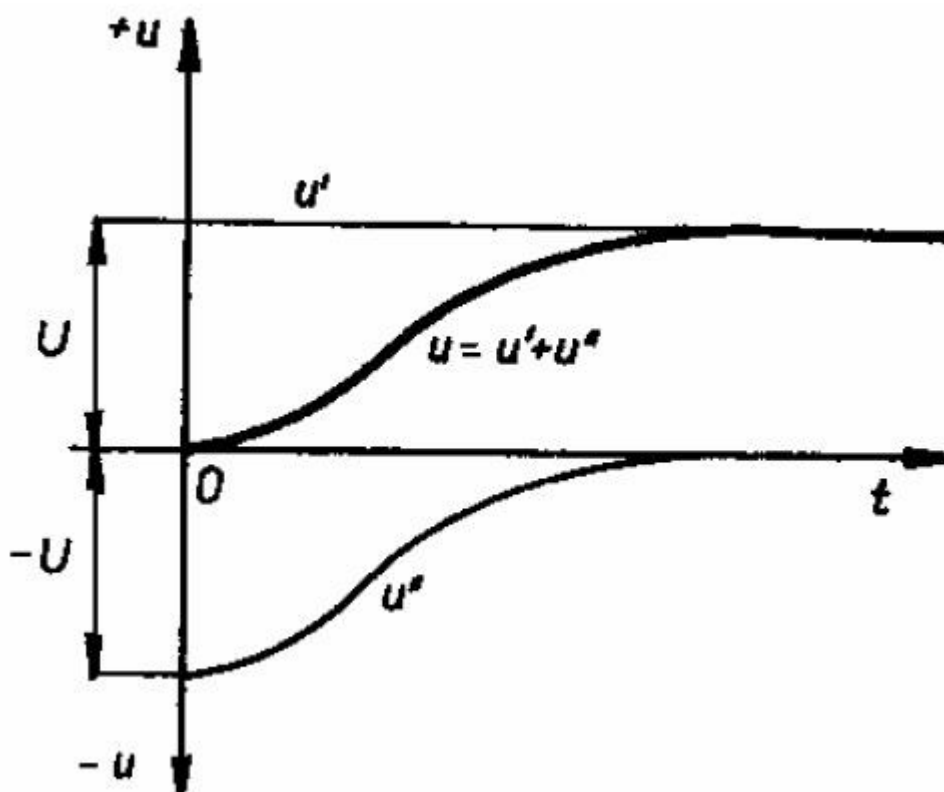
Provedeme dosazení do rozvojového vzorce:

$$u_c = U + \frac{U \cdot e^{(-\alpha+\delta)t}}{3LC(-\alpha+\delta)^2 + 2CR(-\alpha+\delta) + 1} + \frac{U \cdot e^{(-\alpha-\delta)t}}{3LC(-\alpha-\delta)^2 + 2CR(-\alpha-\delta) + 1} \quad (2.26)[1]$$

Po matematické úpravě dostaneme výsledný vztah:

$$u_c = U \cdot \left[1 - \left(\frac{\alpha}{\delta} \sinh \delta t + \cosh \delta t \right) \cdot e^{-\alpha t} \right] \quad (2.27)[1]$$

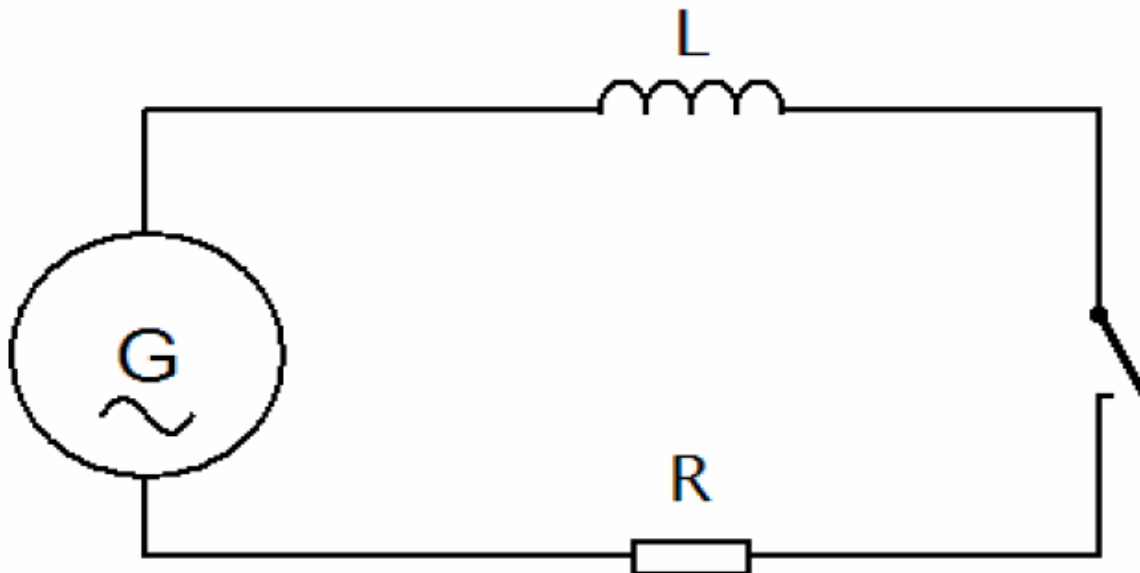
Vidíme, že pokud $R \gg L$, zotavené napětí nezakmitá, nýbrž z počáteční nulové hodnoty vlivem silného tlumení odporem R narůstá aperiodicky na ustálenou hodnotu viz **obr. 2-5**. To je případ z hlediska vypínání zřejmě podstatně příznivější, než případ předchozí. Kritický stav, tj. případ, kdy kmitavý jev přechází právě v aperiodický, je dán takovou velikostí parametrů obvodu, kdy právě $\sqrt{\frac{R^2}{4L^2} - \frac{1}{LC}} = 0$, tedy když $\frac{R^2}{4L^2} = \frac{1}{LC}$, odkud $R = 2\sqrt{\frac{L}{C}}$. Při tomto poměru R, L a C jsou druhý třetí kořen rovnice $N_{(p)} = 0$ reálně stejné.[1]



obr. 2-5 Aperiodický narůstající zotavené napětí[1]

2.3 Přechodové děje střídavých obvodů

2.3.1 Zapínání střídavých obvodů



obr. 2-6 Střídavý RL obvod[1]

Připojíme-li obvod s odporem R a indukčností L dle obr. 2-6 na střídavé napětí $u = U_m \cdot \sin(\omega t + \kappa)$, tj. na napětí s amplitudou U_m , kruhovou frekvencí $\omega = 2\pi f$ a fází κ po nule napětí, pak je v prvním okamžiku $t = 0$ podobně jako ve stejnosměrném obvodu proud i_0 ještě nula. Jeho další průběh se pak řídí opět podobnou rovnicí:

$$L \frac{di}{dt} + Ri = U_m \cdot \sin(\omega t + \kappa) \quad (2.28)[1]$$

která ale tentokrát má na pravé straně časově proměnný člen se sinovou funkcí. Řešíme ji stejným postupem jako v případě stejnosměrného obvodu, tj. Laplaceovou transformací, harmonickou funkci však přepíšeme pomocí Eulerova vzorce do symbolického komplexního tvaru:

$$L \frac{di}{dt} + Ri = U_m \frac{e^{j(\omega t + \kappa)} - e^{-j(\omega t + \kappa)}}{2j} = \frac{U_m}{2j} [e^{j(\omega t + \kappa)} - e^{-j(\omega t + \kappa)}] \quad (2.29)[1]$$

Obrazem této funkce (opět platí $i_0 = 0$) je výraz:

$$pLj + Rj = \frac{U_m}{2j} \left[\frac{e^{j\kappa}}{p - j\omega} - \frac{e^{-j\kappa}}{p + j\omega} \right] \quad (2.30)[1]$$

Odtud:

$$J = \frac{U_m e^{j\kappa}}{2j} \cdot \frac{1}{(pL + R)} - \frac{U_m e^{-j\kappa}}{2j} \cdot \frac{1}{(pL + R)(p + j\omega)} \quad (2.31)[1]$$

Zpětnou transformaci provedeme opět pomocí Heavisideaova rozvoje:

$$\left[N_{1(p)} = 2pL + R - j\omega L; p_{11} = -\frac{R}{L}; p_{12} = j\omega; N_{2(p)} = 2pL + R + j\omega L; \right]$$

$$p_{21} = -\frac{R}{L}; p_{22} = -j\omega \quad (2.32)[1]$$

Zavedeme označení $\frac{\omega L}{R} = \tan \varphi$ a použijeme obratu $\sin(\kappa - \varphi) = \cos \varphi (\sin \kappa - \tan \varphi \cos \kappa)$

Pak:

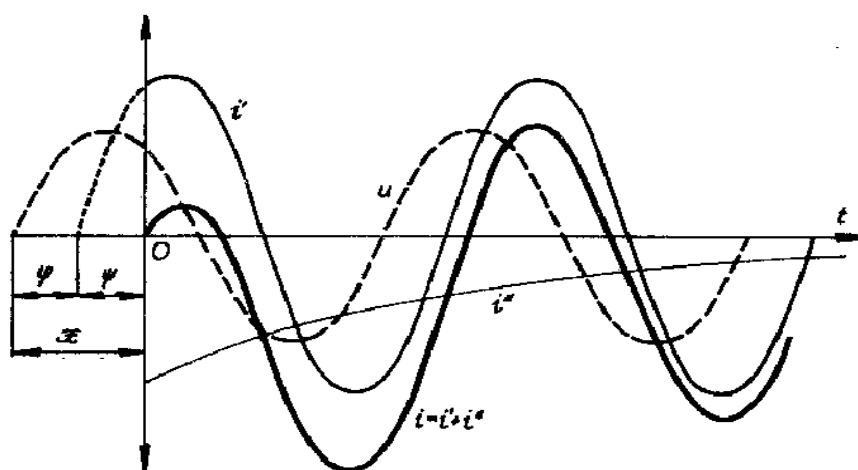
$$i = \frac{U_m}{R^2 + \omega^2 L^2} \left[-\frac{R}{\cos \varphi} \sin(\kappa - \varphi) e^{-\frac{R}{L}t} + \frac{R}{\cos \varphi} \sin(\omega t + \kappa - \varphi) \right] \quad (2.33)[1]$$

Poněvadž:

$$\frac{R}{\cos \varphi} = \sqrt{R^2 + \omega^2 L^2} = Z; \quad \frac{U_m}{Z} = I_m \quad (2.34)[1]$$

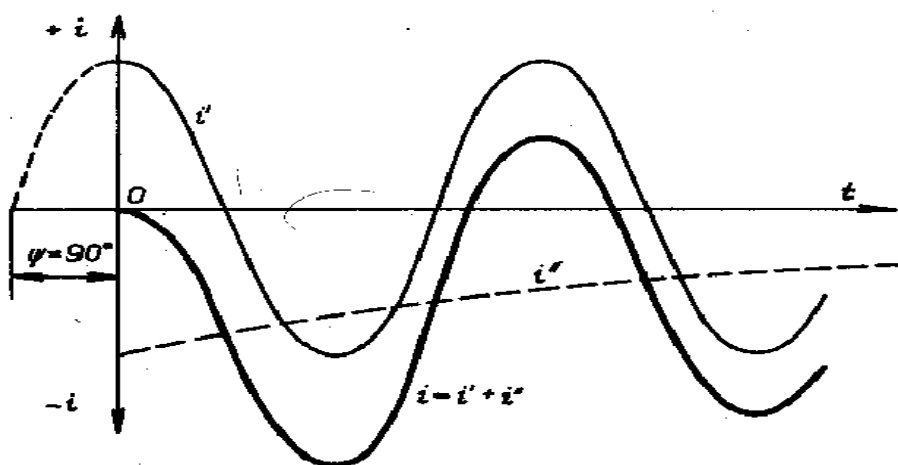
Výsledná rovnice proudu (vztažená k časovému průběhu napětí, za nímž se opožďuje o časový úhel φ) je pak:

$$i = i' + i'' = I_m \left[\sin(\omega t + \kappa - \varphi) - \sin(\kappa - \varphi) \cdot e^{-\frac{R}{L}t} \right] \quad (2.35)[1]$$



obr. 2-7 Zapínací proud střídavého obvodu[1]

Při napojení střídavého napětí na jednoduchý obvod se překládá přes ustálený proud i' opět přechodná složka stejnosměrná, která zaniká podle časové konstanty $\tau = \frac{L}{R}$ a zkresluje průběh ustáleného proudu během přechodné doby po sepnutí obvodu. Velikost zkreslení je závislá na časovém úhlu $\psi = (\kappa - \varphi)$, který by měl ustálený proud v okamžiku sepnutí. Je-li tento úhel roven $\pm 90^\circ$, tzn. kdy bychom sepnuli obvod v maximu ustáleného proudu, objeví se stejnosměrná složka, mající na svém začátku plnou velikost amplitudy ustáleného proudu viz **obr. 2-7**. Naopak, je-li úhel fáze v okamžiku sepnutí nula nebo 180° , prochází ustálená složka právě nulou a pak se neobjeví žádný přechodový proud. Střídavý proud nabývá v tomto (jediném) případě ihned svého ustáleného průběhu.[1]



obr. 2-8 Maximální proud při zapínání (nejhorší možný stav)[1]

Obecně je počáteční hodnota stejnosměrné přechodné složky určena výrazem $-I_m \sin(\kappa - \varphi)$ takže je vždy rovna záporné hodnotě okamžité velikosti ustáleného proudu, který by existoval v okamžiku sepnutí a doplňuje jej tak, aby i výsledný proud začínal nulovou hodnotou. Na **obr. 2-8** je znázorněn případ nejnepříznivějšího sepnutí. V tomto případě probíhá totiž výsledný proud zpočátku asymetricky, takže vznikají nadproudy až téměř dvojnásobné hodnoty maxim ustáleného proudu.[1]

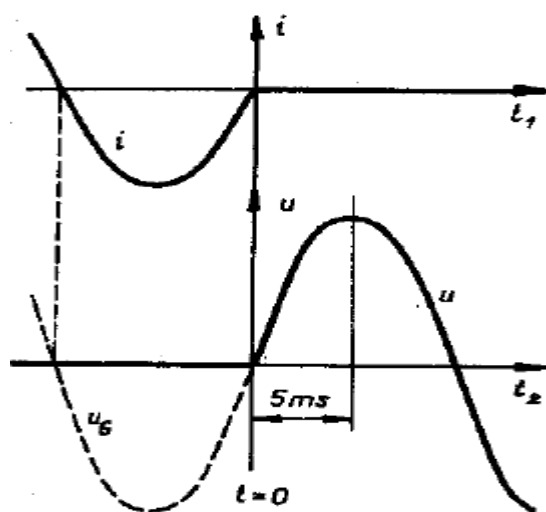
Pokud bychom uvažovali teoretický případ ryze induktivního proudu kde $R = 0$, pak by stejnosměrná složka byla konstantní a v případě sepnutí proudu v maximu ustálené složky by proud trvale kmital po jedné straně nulové osy mezi hodnotou nulovou a dvojnásobkem amplitudy proudu. Tento případ nastat nikdy nemůže. Prakticky se nevyskytují obvody s účinníkem nižším než asi $\cos \varphi = 0,07$. Při časové konstantě odpovídající tak vysoce induktivnímu obvodu ($\tau = \frac{1}{\omega \cos \varphi}$) s kmitočtem $f = 50\text{Hz}$ poklesne stejnosměrná složka za jednu půlvlnu, tj. za $0,01\text{s}$ asi na 80% původní hodnoty v čase $t = 0$. Z těchto hodnot pak

vyplývá koeficient $1,8 \cdot \sqrt{2} = 2,54$ běžně normami uvažovaný pro určení největší možné velikosti první špičky proudu po sepnutí obvodu jako násobku efektivní hodnoty ustáleného proudu.[1]

2.3.2 Vypínání střídavých obvodů

Uvažujeme nejprve nejjednodušší idealizované případy obvodů:

- a) Ryze ohmický obvod, proud je ve fázi s napětím $\cos \varphi = 1$.



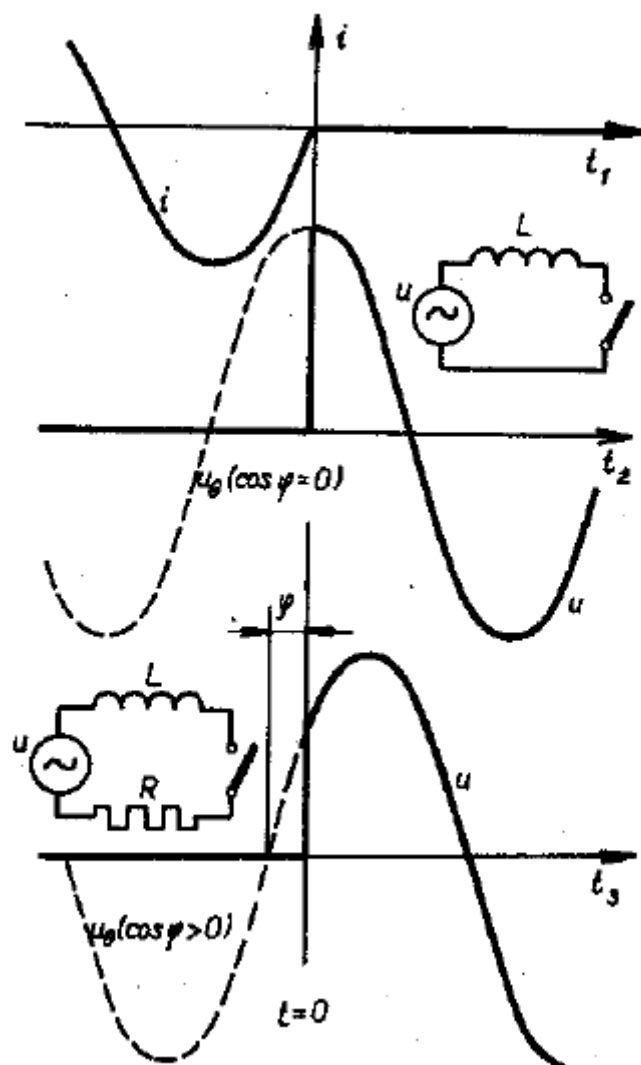
obr. 2-9 Průběh proudu a napětí na kontaktech při vypínání střídavých ryze ohmických obvodů[1]

Průběh proudu a napětí, při vypnutí takového obvodu bez oblouku, je vidět na obr. 2-9. Předpokládejme, že proud končí ve své přirozené nule. Protože je ve fázi s napětím, má v tomto okamžiku nulu i napětí zdroje. Napětí na kontaktech, které až do okamžiku $t = 0$ bylo nulové, může po jejich oddálení sledovat přímo napětí zdroje, neboť se neobjeví žádná přechodná složka. Zotavené napětí narůstá z nulové hodnoty počáteční strmostí

$$\frac{du}{dt_{(t=0)}} = \frac{d}{dt} [U_m \cdot \sin \omega t_{(t=0)}] = \omega U_m \cdot \cos \omega t_{(0)} = \omega U_m \quad (2.36)[1]$$

která se stále zmenšuje. Vrcholové hodnoty dosáhne napětí za čtvrtinu periody, tj. při $f = 50 \text{ Hz}$ za čas $t = \frac{1}{4f} = 0,005 \text{ s}$.

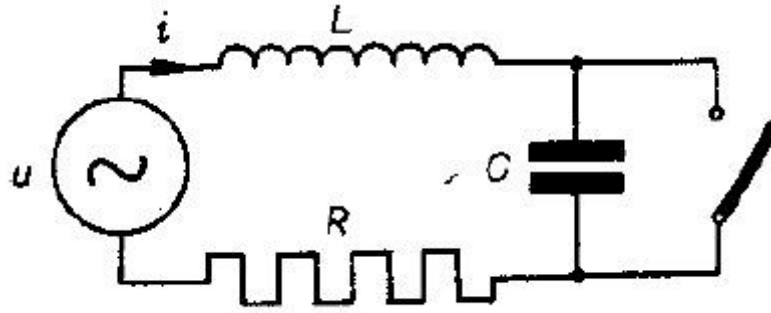
- b) Čistě induktivní obvod, proud se opoždí o $\frac{\pi}{2}$, $\cos \varphi = 0$



obr. 2-10 Průběh proudu na kontaktech při vypínání obvodu s indukčností[1]

Nastane-li přerušení proudu opět v jeho nule, mělo by se mezi vzdalujícími se kontakty objevit skokem nejvyšší možné napětí zdroje, tj. hodnota amplitudy napětí $U_m = U\sqrt{2}$. V tomto případě by byla strmota zotaveného napětí $\frac{du}{dt} = \infty$. Podobně v obecném případě obvodu s odporem i indukčností, tedy v obvodě s účíníkem $0 < \cos \varphi < 1$, by se v čase $t = 0$ při zániku proudu objevilo napětí odpovídající okamžité hodnotě napětí $U_m \cdot \sin \varphi$ opět nekonečně velkou rychlostí.[1]

c) Sériový obvod RLC



obr. 2-11 Sériový obvod RLC[1]

Obvod dle obr. 2-11 je napájen zdrojem o napětí $u = U_m \cdot \sin(\omega t + \kappa)$, je charakterizován rovnicemi:

$$L \frac{di}{dt} + Ri + u_c = U_m \cdot \sin(\omega t + \kappa), \quad u_c = \frac{1}{C} \int i dt, \quad i = C \frac{du_c}{dt} \quad (2.37)[1]$$

po úpravě:

$$LC \frac{d^2 u_c}{dt^2} + RC \frac{du_c}{dt} + u_c = U_m \cdot \sin(\omega t + \kappa) = U_m \frac{e^{j(\omega t + \kappa)} - e^{-j(\omega t + \kappa)}}{2j} \quad (2.38)[1]$$

Průběh napětí na kontaktech je dán průběhem napětí na kapacitě C, která rozpojením spínače je náhle připojena na napětí u a začíná se nabíjet. Časový nárůst napětí řešíme operátorovým počtem při čemž $\zeta u_c = U_c$, $u_{c(t=0)} = 0$.

Obrazová rovnice:

$$p^2 LC U_c + p RC U_c + U_c = \frac{U_m}{2j} \left(\frac{e^{j\kappa}}{p - j\omega} - \frac{e^{-j\kappa}}{p + j\omega} \right) \quad (2.39)(1)$$

Odtud obraz napětí:

$$U_c = \frac{U_m \cdot e^{j\kappa}}{2j(p^2 LC + p RC + 1)(p - j\omega)} - \frac{U_m \cdot e^{-j\kappa}}{2j(p^2 LC + p RC + 1)(p + j\omega)} = \frac{M_{1(p)}}{N_{1(p)}} + \frac{M_{2(p)}}{N_{\check{e}(p)}} \quad (2.40)[1]$$

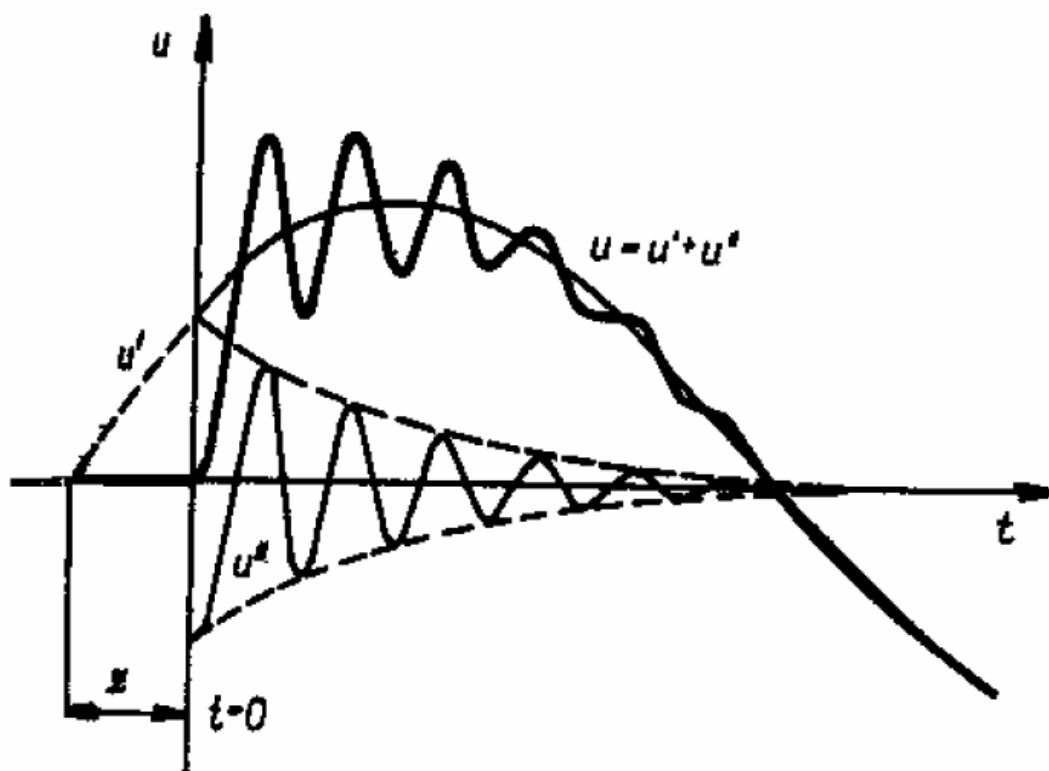
Kořeny rovnice $N_{1(p)} = 0$, $N_{2(p)} = 0$ jsou:

$$p_1 = \pm \omega \quad p_{2,3} = -\frac{R}{2L} \pm \sqrt{\frac{R^2}{4L^2} - \frac{1}{LC}} \quad (2.41)(1)$$

Podle poměrné velikosti R a L můžeme mít podobně jako v případě stejnosměrného obvodu buď při $R \ll L$ druhé a třetí kořeny komplexně sdružené a tudíž kmitavý průběh přechodné složky, nebo pro R relativně velké kořeny reálné a průběh aperiodický. Kritický stav nastává

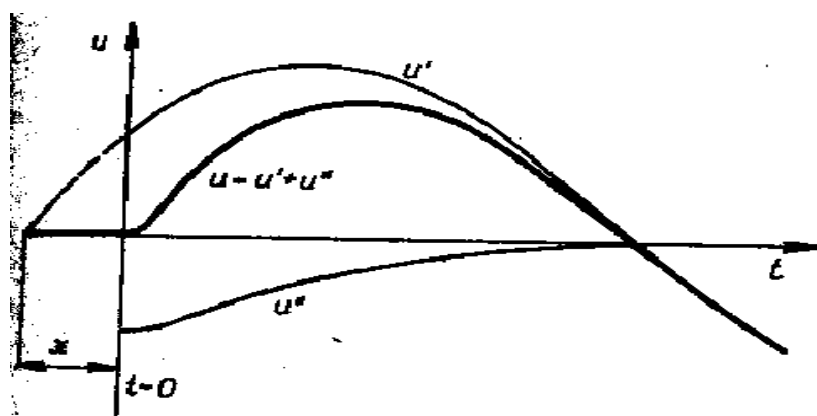
opět při $R = 2\sqrt{\frac{L}{C}}$. Pro první případ, kmitavý případ, dostali bychom zpětnou transformaci obrazové rovnice výsledek:

$$u_c = Um \left[\sin(\omega t + \kappa) - \sin \kappa \left(\frac{\alpha}{\omega_0} \sin \omega_0 t + \cos \omega_0 t \right) \cdot e^{-\alpha t} \right] \quad (2.42)(1)$$



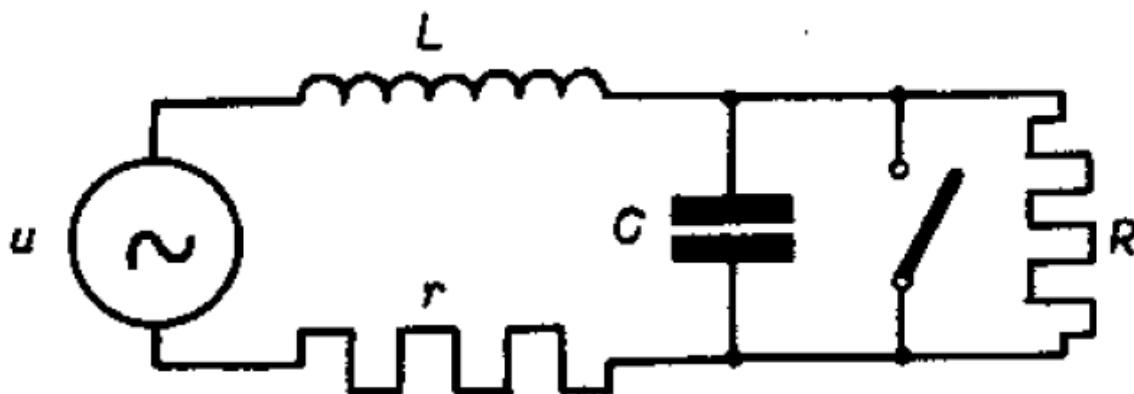
obr.2-12 Tlumeně kmitavý průběh přechodné složky[1]

Pro $R \ll L$ je druhý člen pod odmocninou zanedbatelný a nárůst zotaveného napětí je, jak ukazuje obr.2-13 velmi pomalý.[1]



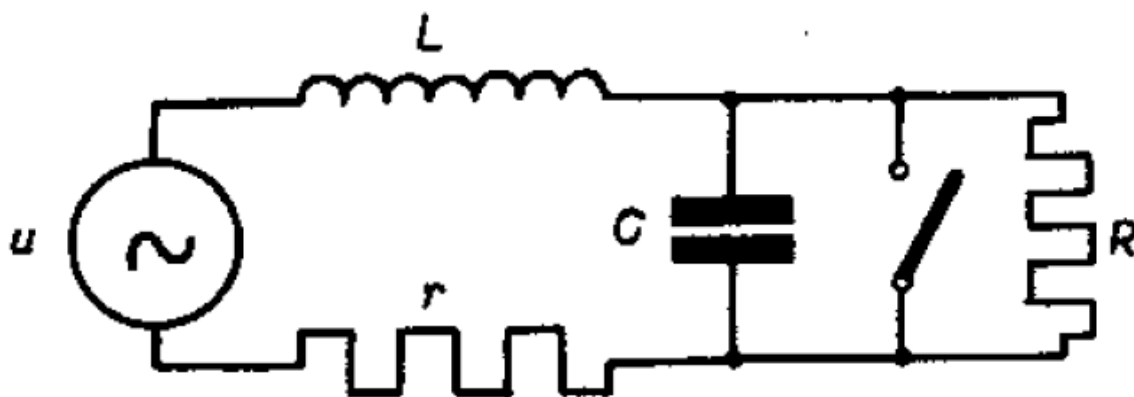
obr.2-13 Aperiodická přechodná složka[1]

d) Paralelní obvod RLC



obr.2-14 Paralelní obvod RLC[1]

Budeme uvažovat obvod dle obr.2-14 jehož odpor $r \ll L$, tedy obvod vysoce induktivní, ve kterém má zotavené napětí kmitavý průběh. Pro zjednodušení výpočtu při dalších úvahách zanedbáváme tento odpor r úplně a přejdeme na obvod podle obr.2-15. [1]



obr.2-15 Zjednodušený paralelní obvod RLC[1]

Obvod dle obr.2-15 je určen rovnicemi:

$$L \frac{di}{dt} + U_C = U_m \cdot \sin(\omega t + \kappa) \quad (2.43)[1]$$

$$i = i_C + i_R \quad (2.44)[1]$$

$$i_C = C \frac{du_C}{dt} \quad (2.45)[1]$$

$$i_R = \frac{u_C}{R} \quad (2.46)[1]$$

Takže:

$$LC \frac{d^2 u_C}{dt^2} + \frac{L}{R} \cdot \frac{du_C}{dt} + u_C = U_m \cdot \sin(\omega t + \kappa) = U_m \frac{e^{j(\omega t + \kappa)} - e^{-j(\omega t - \kappa)}}{2j} \quad (2.47)[1]$$

Obrazová rovnice:

$$p^2 LC U_C + p \frac{L}{R} U_C + U_C = \frac{U_m}{2j} \left(\frac{e^{j\kappa}}{p - j\omega} - \frac{e^{-j\kappa}}{p + j\omega} \right) \quad (2.48)[1]$$

Obraz napětí na kontaktech:

$$U_c = \frac{Um \cdot e^{j\kappa}}{2j \left(p^2 LC + p \frac{L}{R} + 1 \right) (p - j\omega)} - \frac{Um \cdot e^{-j\kappa}}{2j \left(p^2 LC + p \frac{L}{R} + 1 \right) (p + j\omega)} = \frac{M_{1(p)}}{N_{1(p)}} + \frac{M_{2(p)}}{N_{2(p)}} \quad (2.49)[1]$$

Kořeny charakteristických rovnic $N_{1(p)} = 0, N_{2(p)} = 0$ jsou obdobné jako v případě sériového obvodu RLC:

$$p_1 = \pm j\omega, \quad p_{2,3} = -\frac{1}{2RC} \pm \sqrt{\frac{1}{4R^2C^2} - \frac{1}{LC}} \quad (2.50)[1]$$

Podle charakteru kořenů máme opět buď aperiodický nebo kmitavý průběh zotaveného napětí. Aperiodický charakter nabývá zotavené napětí tehdy, je-li $R \ll L$. Velikost odporu se projevuje opačně než v případě sériového obvodu. Podmínka pro aperiodický průběh je právě splněna při kritickém poměru $R = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{L}{C}}$. Čím je R menší než tento kritický poměr, jest průběh napětí přitlumenější.[1]

3 Zkrat

Zkrat je náhodné nebo úmyslné spojení mezi dvěma nebo více vodivými částmi, vedoucími k tomu, že rozdíl elektrických potenciálů mezi těmito vodivými je roven nule nebo má hodnotu blízkou nule. [4]

V místě zkratu dochází k poklesu napětí, přičemž do místa poruchy tečou zkratové proudy ze všech zdrojů soustavy, v závislosti na jejich elektrické vzdálenosti od místa poruchy a výkonech. Úbytky napětí rostou od místa zkratu směrem ke zdrojům, z hlediska účinků proudu je nejvíc ohroženo místo poruchy, kterým protéká výsledný zkratový proud.[4]

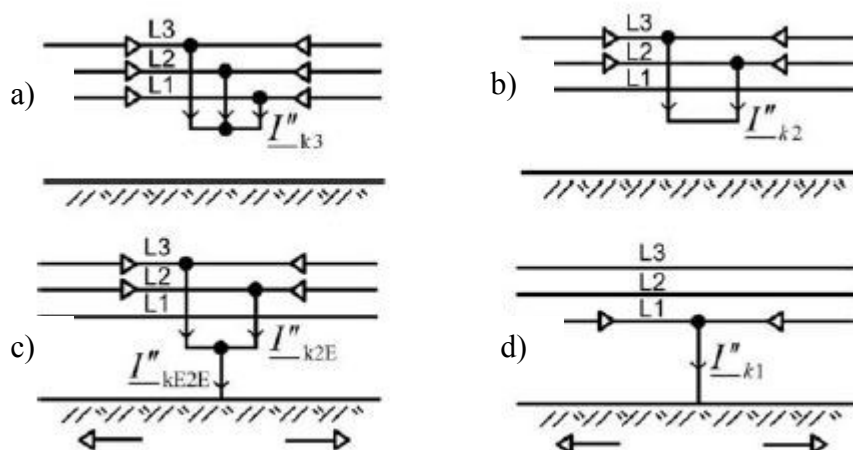
3.1 Rozdělení zkratů

Zkraty rozlišujeme podle vodivého spojení na:

- kovové (dokonalé) se zanedbatelnou impedancí v místě poruchy
- nekovové (nedokonalé) vytvořené přes impedanci, kterou není možné zanedbat např. elektrický oblouk

podle počtu fází na:

- jednofázové- spojení jedné fáze ze zemí
- dvoufázové zemní- dvě fáze spojené se zemí
- dvoufázové- spojení dvou fází
- třífázové- současné spojení všech tří fází v jednom místě



obr. 3-1 Druhy zkratů a) třífázový, b) dvoufázový, c) dvoufázový zemní, d) jednofázový [4]

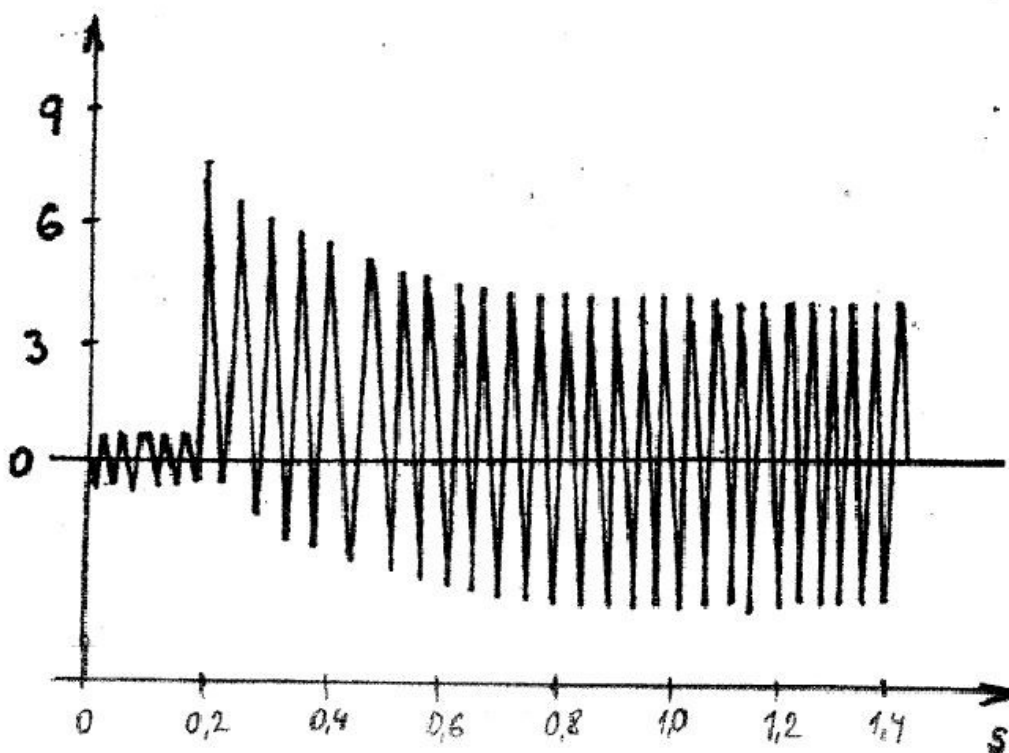
dále zkraty rozlišujeme:

- souměrné- postihuje stejnou měrou všechny fáze
- nesouměrné- postihuje jen některé fáze

Norma ČSN EN 60909 dále rozeznává:

3.2 Elektrický vzdálený zkrat

O elektricky vzdáleném zkratu hovoříme tehdy, pokud je místo dostatečně elektricky vzdáleno od zdrojů zkratového proudu jakými jsou synchronní stroje, nebo pokud je podíl asynchronních motorů na počátečním zkratovém proudu zanedbatelný (do 5%), potom velikost souměrné střídavé složky zkratového proudu (jeho efektivní hodnota) se s časem prakticky nemění, časový průběh se blíží průběhu zkratu s ideálním napěťovým zdrojem.[6]



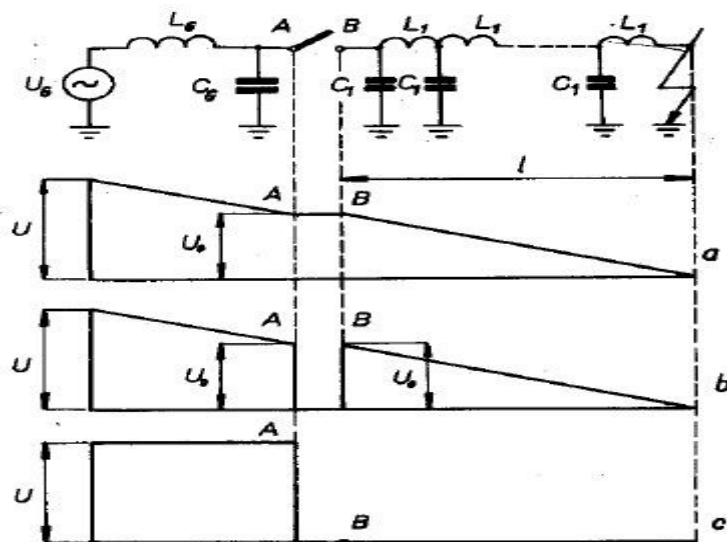
obr. 3-2 Průběh zkratového proudu při elektricky vzdáleném zkratu[4]

3.3 Elektrický blízký zkrat

Elektrický blízký zkrat je takový zkrat, při kterém příspěvek alespoň jednoho stroje k předpokládanému počátečnímu souměrnému rázovému proudu překračuje dvojnásobek jmenovitého proudu stroje, nebo příspěvek asynchronního motoru překračuje 5% počátečního

souměrného rázového proudu I_k'' bez motoru, tento zkrat vznikne na vedení několik málo kilometrů od vypínače.[6]

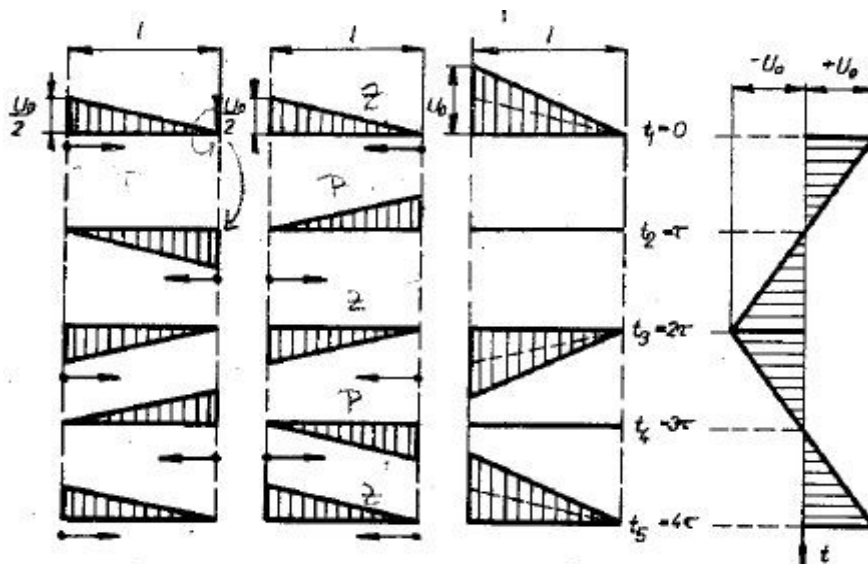
Budeme uvažovat, že vedení mezi vypínačem a místem zkratu je homogenní a bezztrátové. Tj. vedení, jehož náhradní schéma je tvořeno jen podélnými indukčnostmi L_1 a příčnými kapacitami C_1 , které jsou pro všechny elementy vedení naprosto stejné. Prakticky odpovídá tento případ venkovnímu vedení, jsou-li jeho ohmické ztráty zanedbatelné vůči velikosti přenášené energie. Protože jeho délka je jen několik kilometrů, nejedná se ještě o typicky dlouhé vedení, ale pro řešení průběhu napětí po jeho odpojení od zdroje musíme tento úsek již uvažovat jako obvod s rozloženými parametry. Schéma takového obvodu viz **obr. 3-3** kde je současně digramem znázorněno rozložení napětí podél celého vedení v okamžiku zkratu. Napětí proti zemi kontaktů A a B vypínače, který vypíná zkrat, značíme U_0 . Ta zůstávají stejná i v prvním po uhasnutí oblouku, kontakty však již nejsou propojeny. Napětí v tomto okamžiku rozpadu obvodu na dva oddělené úseky zaznamenává diagram b. Napětí na kontaktu A se pak vyrovnává na hodnotu napětí zdroje U , jak je naznačeno na diagramu c. Napětí na kontaktu B, tj. napětí na počátku odpojeného vedení se mění přechodovým jevem typickým pro dlouhé vedení na hodnotu nulovou. Průběh zotaveného napětí na vypínači je pak dán rozdílem potenciálu kontaktů A a B. [1]



obr. 3-3Náhr. schéma venkovního vedení a diagram rozložení napětí podél celého vedení v okamžiku zkratu [1]

Nejprve si všimneme průběhu napětí na kontaktu B. Kontakt B představuje vstupní svorku vedení, které je v tomto místě odpojeno. V okamžiku uhasnutí oblouku, tj. v čase $t = 0$, jest na tomto vstupu napětí U_0 . Vedení délky l jest na odlehlelém konci spojeno nakrátko. To znamená, že napětí U na tomto konci musí být nulové. Tvar napět'ové vlny tedy odpovídá průběhu

naznačený na diagramu b obr.3-4. Nejvyšší hodnota napětí U_0 se šíří po vedení rychlostí $v = \frac{1}{\sqrt{LC}}$, která se blíží rychlosti světla. Dráhu l proběhne za čas $\tau = \frac{l}{v}$. Za stejný čas dorazí nulová hodnota trojúhelníkové vlny od konce vedení k jeho otevřenému začátku. To znamená, že za čas $\tau = \frac{l}{v}$ klesne napětí v kontaktu B na hodnotu nulovou. Tato změna v důsledku trojúhelníkového tvaru vlny probíhá přímo úměrně s časem.[1]



obr.3-4 Průběh vstupního napětí výslednou vlnou rozloženou na její složky [1]

Velikost amplitudy U_0 je dána velikostí napětí kontaktů proti zemi v okamžiku zkratu. Abychom zjednodušili její výpočet, zanedbáme také činný odpor úseku mezi generátorem a vypínačem. Toto zjednodušení je přípustné, neboť činný odpor bývá skutečně mnohem menší než jeho reaktance. Označíme-li indukčnost jednotky délky odpínaného vedení L_l , pak je napětí na kontaktech dáno vztahem:

$$U_0 = I_k \sqrt{2} \cdot \omega L_l l \quad (3.1)[1]$$

kde I_k je efektivní hodnota vypínaného (zkratového) proudu. Protože u trojfázového vedení je

$$I_k = \frac{U}{\sqrt{3} \cdot \omega (L_G + l L_l)} \quad (3.2)[1]$$

dosazením pak amplituda je:

$$U_0 = \frac{U \sqrt{2} \cdot l L_l}{\sqrt{3} (L_G + l L_l)} \quad (3.3)[1]$$

Kmitočet pilových kmitů je určen délkou l vypínaného úseku. Se zkracující se vzdáleností místa zkratu od vypínače roste hyperbolicky

$$f_0 = \frac{v}{4 \cdot l} \quad (3.4)[1]$$

Přesný vztah pro kmitočet f_0 obdržíme, vyjdeme-li ze vztahu pro rychlost šíření elektromagnetické vlny

$$v = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}} \quad (3.5)[1]$$

a použijeme-li současně výrazu pro vlnovou impedanci

$$Z = \sqrt{\frac{L_1}{C_1}} \quad (3.6)[1]$$

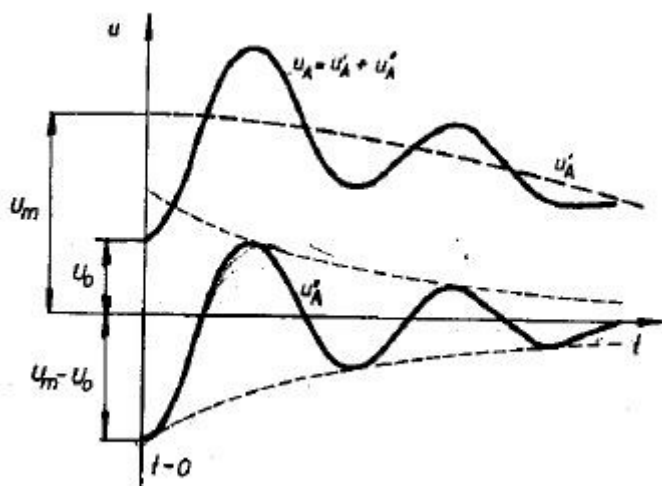
pak

$$f_0 = \frac{v}{4 \cdot l} = \frac{1}{4l\sqrt{L_1 C_1}} \cdot \frac{\sqrt{L_1}}{\sqrt{L_1}} \cdot \frac{I_k \sqrt{2} \cdot \omega}{I_k \sqrt{2} \cdot \omega} = \frac{\omega Z I_k \sqrt{2}}{4 U_0} \quad (3.7)[1]$$

Strmost kmitů s_0 je dána přímo poměrem amplitudy napětí k času τ , za který napětí naroste z nulové hodnoty na vrcholovou hodnotu

$$s_0 = \frac{U_0}{\tau} = 4 f_0 U_0 = \omega Z I_k \sqrt{2} \quad (3.8)[1]$$

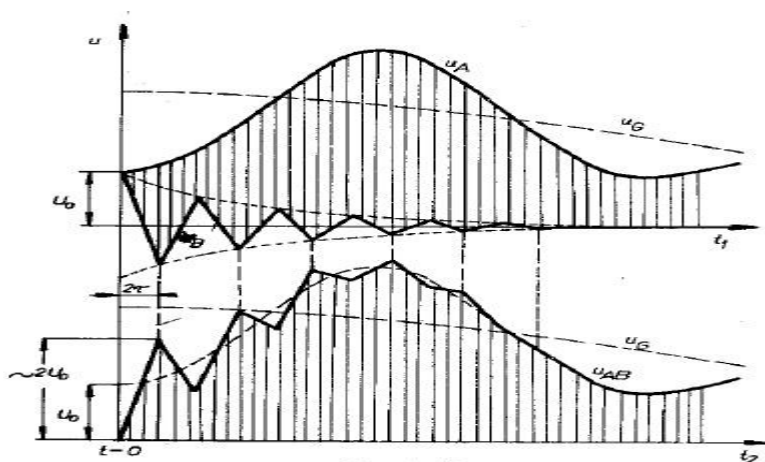
Průběh napětí na kontaktu A po přerušení proudu je dán přechodným jevem, určeným parametry úseku mezi generátorem a vypínačem. Je to známý průběh, při němž se přes generátorem vnucené tzv. obnovené napětí u'_a překládají kmity přechodné složky u''_a . Frekvenci přechodných kmitů určuje podle obr. 3-3 indukčnost L_G a kapacita C_G . Jejich počáteční velikost pak rozdíl mezi hodnotou obnoveného napětí v čase $t = 0$ a předchozí hodnotou napětí na kontaktu A, tj. hodnotou U_0 viz obr.3-5.[1]



obr.3-5 Průběh napětí na kontaktu A po přerušení proudu [1]

Výsledné napětí mezi kontakty vypínače A a B jako rozdíl potenciálu je zakreslen viz **obr.3-6**. Na časové ose t_1 je znázorněn průběh potenciálu u_A a u_B na kontaktech A a B a na časové ose t_2 jejich rozdíl, představující výsledný průběh napětí při vypínání blízkého zkratu. Pilové kmity s počáteční amplitudou U_0 jsou zakresleny tak, jak ve skutečnosti probíhají, tj. včetně vlivu činného odporu vedení (dosud zanedbávaného), který vyvolává útlum amplitud, tak že jejich velikost se s časem exponenciálně zmenšuje až do úplného zániku. Na začátku však ovlivňuje průběh zotaveného napětí markantně. Počáteční strmost zotaveného napětí není zde dána kmitočtem přechodné složky superponované na obnoveném napětí, ale samotným průběhem pilových kmitů. První amplitudu vytváří výsledné napětí v čase $t = 2\tau = \frac{1}{f_0}$. Její velikost je dána součtem amplitudy pilových kmitů v čase 2τ , která je vlivem útlumu o něco menší než U_0 , a okamžitou hodnotou zotaveného napětí generátorového obvodu u_A . Zotavené napětí generátorového obvodu vychází z hodnoty U_0 , proti které se za čas 2τ o něco zvýší. Pokládáme-li snížení amplitudy pilových kmitů a zvýšení zotaveného napětí generátorového obvodu, (které jsou samy o sobě proti velikosti U_0 velmi malé) za řadově stejné, jejich vliv se navzájem ruší a průběh prvního kmitu výsledného zotaveného napětí u_{AB} je dán průběhem netlumného pilového kmitu. To znamená, že velikost prvního vrcholu a počáteční strmost zotaveného napětí je určená uvedenými vzorci pro U_0 a s_0 a to jako jejich dvojnásobek.[1]

Vliv pilových kmitů na počáteční průběh zotaveného napětí se ovšem projeví jen tehdy, bude-li jejich kmitočet podstatně vyšší než kmitočet vlastních kmitů generátorového obvodu. Uvažujeme-li, že kmitočet 5000 Hz není ještě pro vypínače nebezpečně vysoký, je zřejmé, že popsany průběh zotaveného napětí s přeloženými kmity se může nepříznivě projevit při zkratu vzdáleném od vypínače ne více než asi 10 km. Čím bude tato vzdálenost kratší, tím vyšší bude kmitočet pilových kmitů tím i počáteční strmost zotaveného napětí.[1]



obr.3-6 Výsledné napětí mezi kontakty vypínače[1]

Mimořádně strmý nárůst zotaveného napětí jako důsledek málo vzdáleného místa zkratu také mimořádně namáhá prostor mezi kontakty, kde se v prvních miliontinách vteřiny po zániku oblouku nachází stále poměrně velký počet nosičů náboje. Tento počet je tím větší, čím větší byl zkratový proud. Proud při blízkém zkratu může dosáhnout 70 až 90 % hodnoty proudu při zkratu těsně za vypínačem, tedy hodnoty dosti blízké i jmenovitému vypínacímu proudu vypínače.[1]

Blízký zkrat je proto považován za jeden z nejnepříznivějších spínacích případů z hlediska vypínací schopnosti vypínače.

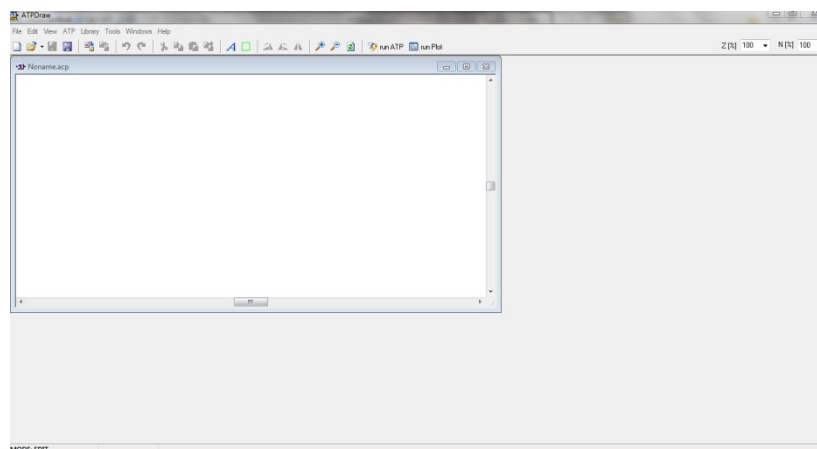
4 Modelování v programu ATP Draw

4.1 Program ATP Draw

Program EMTP (Elektro Magnetic Transients Program) byl vyvinut v USA v Bonneville Power administrativ (BPA), úřadem U.S.Department of energy, v městě Portland ve státě Oregon a v 80. letech ho upravil Dr. W.S. Meyer a označil ho ATP (Alternative Transients Program). ATP-EMTP pracuje pod operačním systémem Unix včetně GNU/Linux a dále pod Windows. Program ATP je dostupný jen v anglické verzi. Český uživatel patří do evropské skupiny uživatelů (EEUG). Program sám je z kategorie Royal Freeware, což znamená, že je dostupný pouze licencovaným uživatelům a jen pro ně je volně šiřitelný. V rámci ročního poplatku dostává uživatel tiskové materiály a jednou ročně upgrade programu a jeho doplňků na CD. Z poplatků jsou financovány další aktivity jako mezinárodní internetová konference, webové stránky s průběžným upgrade, činnost organizátorů a zástupců jednotlivých světových skupin apod.[7,8]

Program je napsán v jazyku Fortran a práci s ním dělá uživatelsky přístupnou grafický preprocesor ATP Draw. Pro grafické znázornění vypočtených průběhů existuje řada postprocesorů jako Plot XY, PC Plot, TP Plot, GTP Plot aj.. Základní program a podpůrné programy se stále vyvíjejí. Knihovna programu obsahuje lineární i nelineární modely prvků obvodu a program je doplněn o procedury jako BCTRAN pro vygenerování parametrů modelů transformátorů, nebo Line Constants a Cable Constants resp. Parametrs pro vygenerování parametrů vedení a další procedury.[7,8]

Práce s programem ATP Draw spočívá, zjednodušeně řečeno, v nakreslení schématu pro sledovaný přechodný děj v ATP Draw a v zadání příslušných hodnot jednotlivých prvků v modelech obvodu. Nato je vygenerován datový soubor a spuštěno řešení v jazyku Fortran. Vypočtené hodnoty je pak možno prohlížet některým z grafických postprocesorů.[7,8]

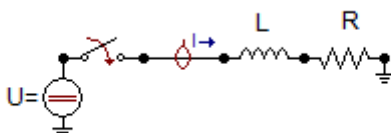


obr.4-1 Úvodní obrazovka programu ATP Draw

4.2 Práce s programem ATP Draw

Pro názornou ukázkou jak pracovat s programem ATP Draw jsem si zvolil dva jednoduché obvody. Na těchto obvodech si vyzkoušíme nasimulovat přechodný děj při zapínání a vypínání stejnosměrného obvodu. Oba obvody jsou podobné, přechodný děj závisí na velikostech indukčnosti a odporu a při vypínání se ještě musí vzít potaz kapacita vedení.

4.3 Model zapínání stejnosměrného elektrického obvodu



obr.4-2 Model zapínání stejnosměrného obvodu v programu ATP Draw

Přechodný děj při zapínání stejnosměrného obvodu podle obr.4-2 je nejjednodušší možný případ. Přechodový děj se skládá ze dvou složek a to přechodné složky a ustálené. Z hodnot indukčnosti a odporů vypočteme hodnotu τ . Čím menší je časová konstant τ , tím rychleji přejde děj do ustáleného stavu viz graf 4-1.

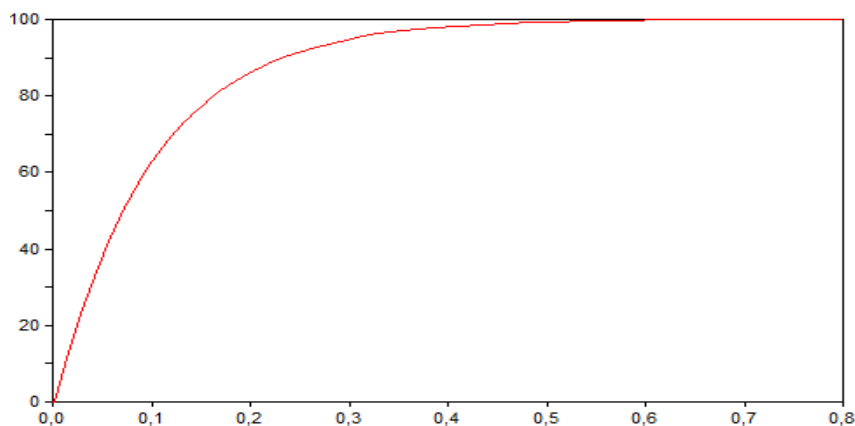
Parametry obvodu:

$$U = 100V$$

$$R = 10\Omega$$

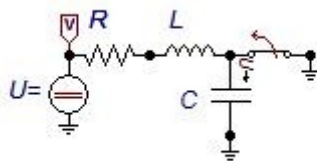
$$L = 100mH$$

$$\tau = \frac{L}{R} = \frac{0,1}{10} = 0,01$$



graf 4-1 Průběh proudu při zapínání stejnosměrného obvodu

4.4 Model vypínání stejnosměrného elektrického obvodu



obr.4-3 Model vypínání stejnosměrného obvodu v programu ATP Draw

Při vypínání stejnosměrného obvodu platí obdobné podmínky jako při zapínání, tj. přechodový děj se skládá s přechodové a ustálené složky, ale musíme uvažovat i o kapacitě vedení vypínaného obvodu. Při vypnutí (oddálení kontaktů), dochází k přemostění kontaktů vypínače a kapacita se nabije na velikost napětí zdroje, při vypnutí můžou nastat tyto dva druhy přechodných stavů:

- tlumeně kmitavý průběh- tento stav, kdy napětí kmitá, až do ustálení kolem napětí zdroje je dán poměrem indukčnosti a odporu, kdy indukčnost je několika násobně větší než odpor
- aperiodický průběh- tento stav nastává při velké hodnotě odporu vůči indukčnosti

Parametry obvodu pro tlumeně kmitavý průběh:

$$U = 100V$$

$$R = 10\Omega$$

$$L = 100mH$$

$$C = 1\mu F$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{100 \cdot 10^{-3} \cdot 1 \cdot 10^{-6}}} \cong 3162Hz$$

Parametry obvodu pro aperiodický průběh:

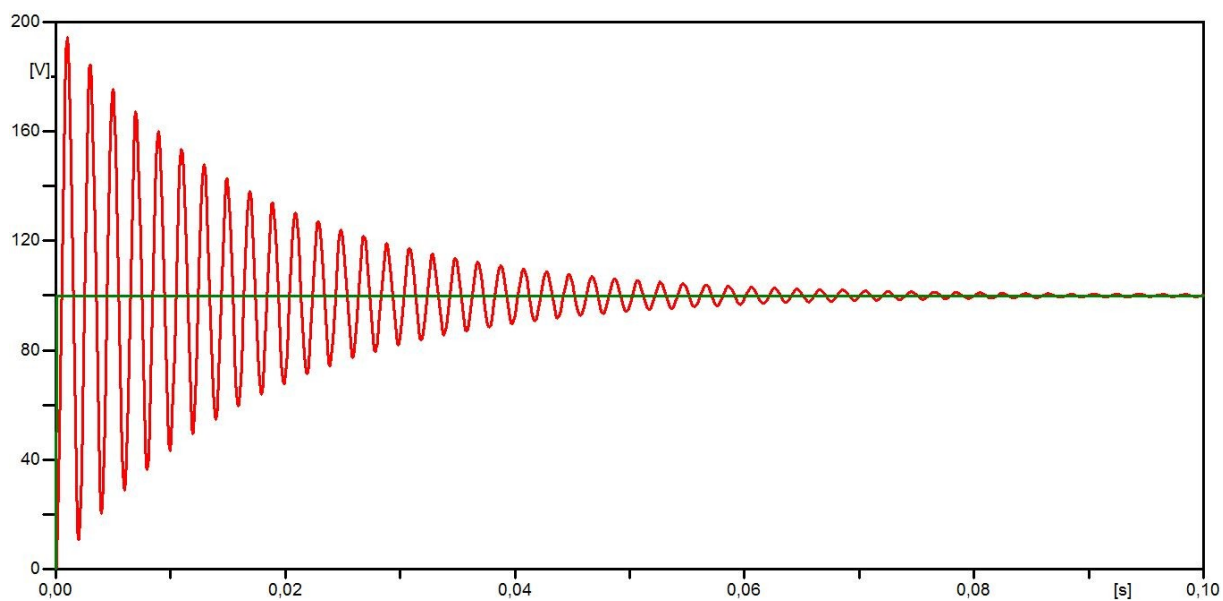
$$U = 100V$$

$$R = 600\Omega$$

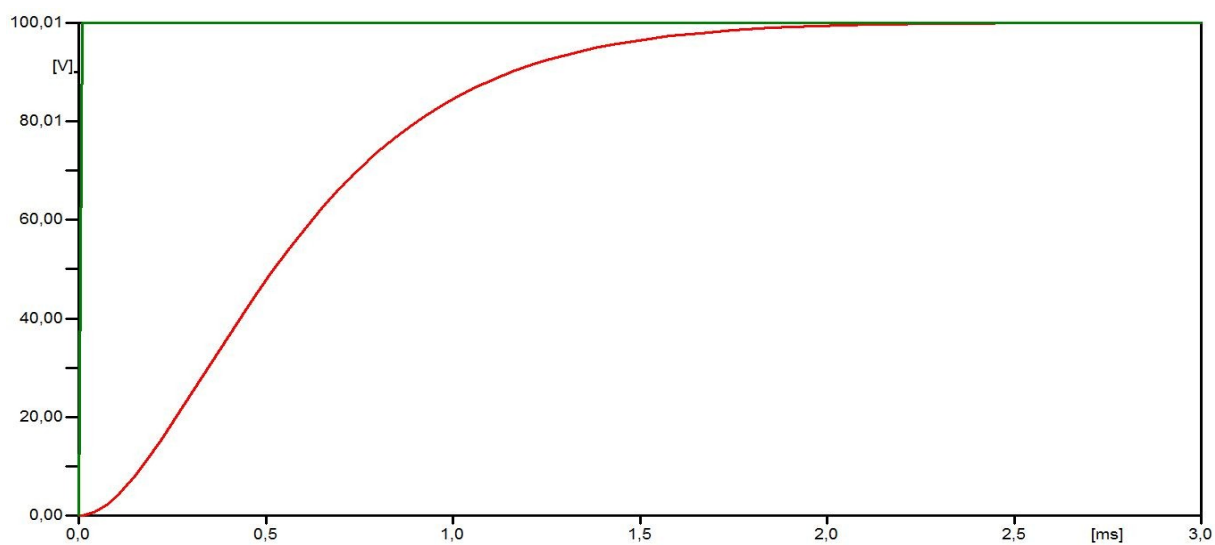
$$L = 100mH$$

$$C = 1\mu F$$

Všechny hodnoty zůstaly stejné, až na velikost odporu, aby se splnila podmínka $R \gg L$



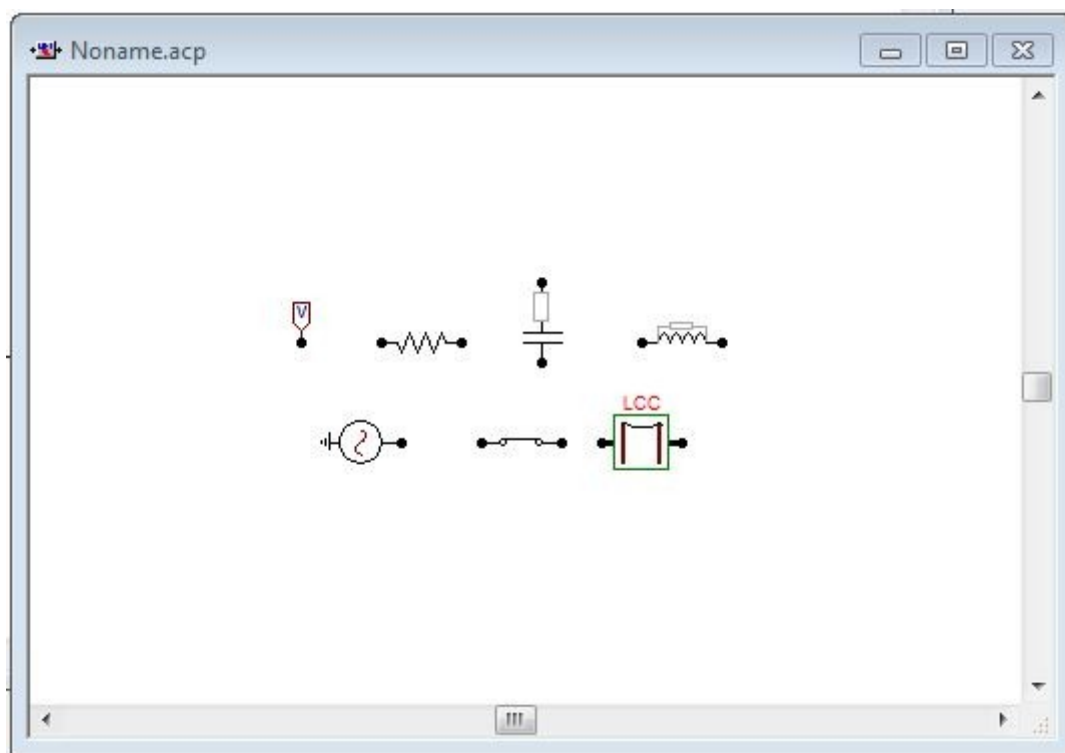
graf 4-2 Průběh napětí při vypínání stejnoměrného obvodu tlumeně kmitavý průběh



graf 4-3 Průběh napětí při vypínání stejnosměrného obvodu aperiodický průběh

4.5 Model vypínání blízkého zkratu

Nyní budeme modelovat vypínání elektricky blízkého zkratu. Na rozdíl od předešlého případu, kdy jsme při vytváření modelu nastavovaly jen hodnoty jednotlivých prvků jako odpor, kapacita a indukčnost, tak teď je třeba u jednotlivých položek nastavit více hodnot, aby model správně pracoval.



obr.4-4 Prvky pro model vypínání blízkého zkratu

Se zadáváním údajů začneme u napětíové sondy a časově řízeného spínače.

Probe Volt – Napětíová sonda, v daném uzlu určuje napětí proti zemi. V dialogovém okně se nastaví použití v jednofázovém nebo třífázovém obvodu.

Switch time controlled – Časově řízený spínač. V dialogovém okně se určí okamžik sepnutí spínače T-cl, okamžik rozepnutí spínače T-op zadávaný v sekundách.

Dalším prvkem je zdroj. Společná je pro zdroje volba U/I, volíme, zda se jedná o zdroj napětíový nebo zdroj proudový. Dále je třeba zadat amplitudu daného zdroje, která bude mít rozměr jednotek voltů nebo ampérů v závislosti na nastavení U/I. Mezi další parametry patří nastavení startovacího času zdroje StartA a čas, kdy stroj ukončí svoji činnost StopA. Dané časy jsou zadány v sekundách. U střídavého zdroje se k výše zmíněným parametrům přibude

nastavení frekvence, dále fázový posuv zdroje. Dále můžeme zvolit zda se jedná o zdroj jednofázový či třífázový.[7]

Component: ACSOURCE

Attributes

DATA	UNIT	VALUE
AmplitudeA	Volt	1
Frequency	Hz	50
PhaseAngleA	degrees	0
StartA	sec	-1
StopA	sec	100

NODE	PHASE	NAME
AC	1	XX0001

Copy Paste entire data grid Reset Order: 0 Label:

Comment:

Type of source: ☐ Current ☒ Voltage

Num phases: ☒ Single ☐ 3-phase ☐ 3*1-phase

Angle units: ☒ Degrees ☐ Seconds

Amplitude: ☒ Peak L-G ☐ RMS L-G ☐ RMS L-L

Grounding: ☒ Grounded ☐ Ungrounded

☐ Hide

Edit definitions OK Cancel Help

obr.4-5 Karta nastavení zdroje

Dalšími prvky, který je třeba nastavit jsou rezistor, induktor a kapacitor. Hodnota odporu je v dialogovém okně nastavení (Attributes) zadána v ohmech. Označení uzlů je informační a nezadá se (From = počáteční uzel rezistoru, To = konečný uzel rezistoru). Obdobně se nastavují zbývající dva prvky, indukčnost se nastavuje v mH a kapacita μF . [7]

Component: RESISTOR

Attributes

DATA	UNIT	VALUE
RES	Ohm	3

NODE	PHASE	NAME
From	1	XX0004
To	1	XX0005

Copy Paste entire data grid Reset Order: 0 Label:

Comment:

Output

0 - No

☐ Hide

☐ \$Vintage,1

Edit definitions OK Cancel Help

obr.4-6 Karta nastavení R prvku

Component: IND_RP

Attributes

DATA	UNIT	VALUE
L	mH	10
Kp	Damp. 5-10	7.5

NODE	PHASE	NAME
From	1	XX0001
To	1	XX0004

Copy Paste entire data grid Reset Order: 0 Label:

Comment:

Output

0 - No

☐ Hide

☐ \$Vintage,1

Edit definitions OK Cancel Help

obr.4-7 Karta nastavení L prvku

Component: CAP_RS

Attributes

DATA	UNIT	VALUE
C	μF	10
Ks	Damp 0.1-0.2	0.15

NODE	PHASE	NAME
From	1	
To	1	XX0005

Copy Paste entire data grid Reset Order: 0 Label:

Comment:

Output

0 - No

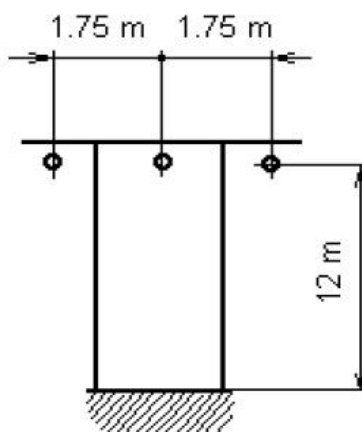
☐ Hide

☐ \$Vintage,1

Edit definitions OK Cancel Help

obr.4-8 Karta nastavení C prvku

Přenosová vedení lze v programu ATP modelovat mnoha způsoby a to od nahrazení vedení prvkem RLC až po procedury Line a Cable Constants, které generují obvodové parametry vedení ze zadaných rozměrů a materiálových konstant. Jako vodič budeme uvažovat AlFe6 120 mm², typ stožáru a rozmístění vodičů viz obr.4-9.[7]

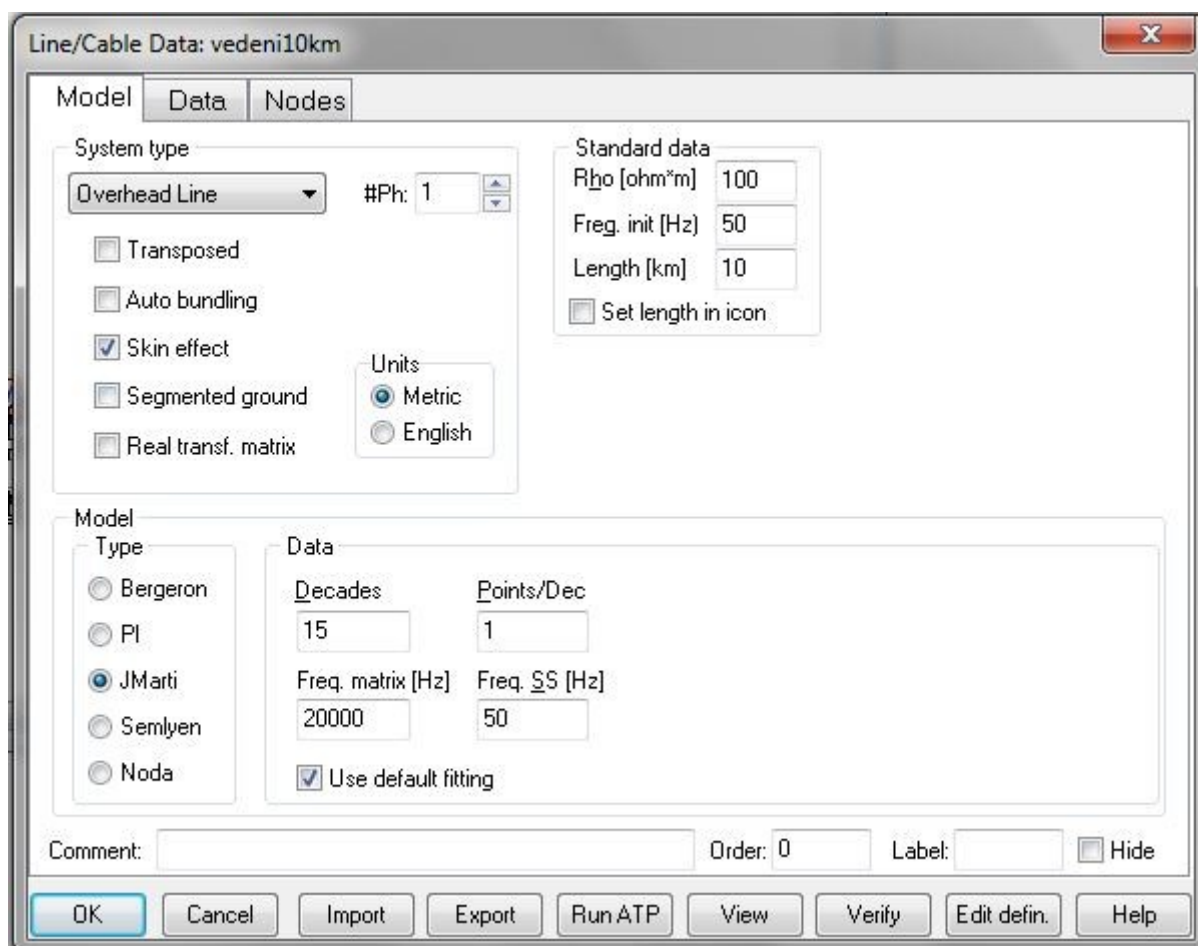


obr.4-9 Rozmístění vodičů na stožáru 110kV [8]

Pomocí procedury **Line/Cable** je možno vygenerovat požadovaný typ vedení postupným zadáváním jednotlivých parametrů.

Po zvolení modelu vedení, následuje otevření dialogového okna. Dialogové okno obsahuje tři záložky **Model**, **Data** a **Nodes**.

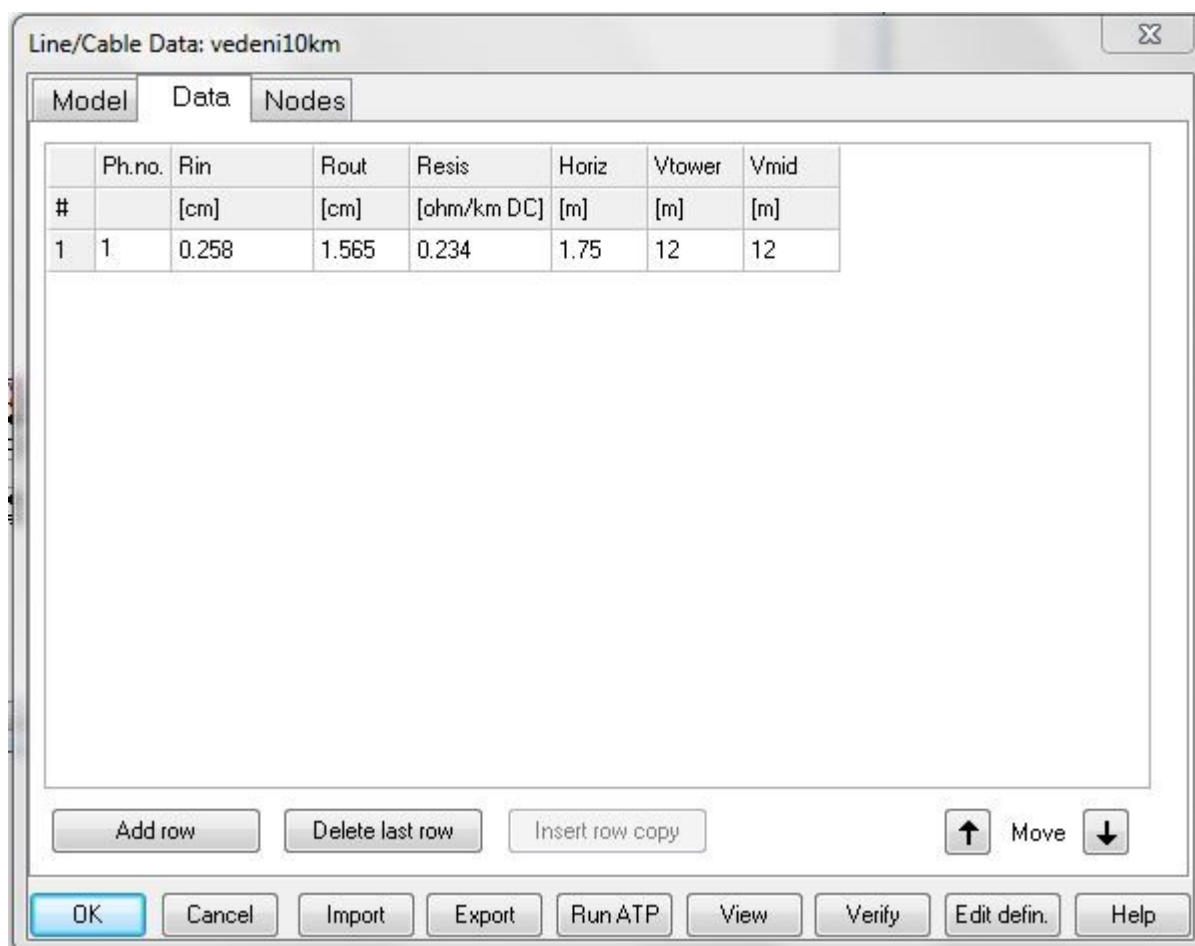
V záložce **Model** můžeme nastavit typ přenosového vedení, zda se jedná o transponované vedení, či budeme respektovat skin efekt. Dále si můžeme zvolit metrickou nebo anglickou soustavu. ATP umožňuje modelovat vedení pomocí modelů jak se soustředěnými parametry tak s rozloženými parametry. Položka **standard data** obsahuje tři parametry. **Rho** je měrná rezistivita země, **Freg.init** je frekvence, pro kterou budou parametry počítány a **length** je délka vedení v závislosti na zvoleném jednotkovém systému.[7]



obr.4-10 dialogové okno záložka **Model**

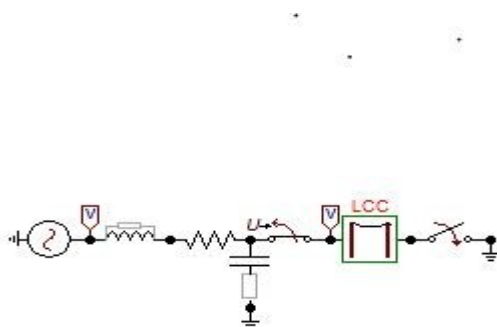
V záložce **Data** nastavíme pořadové číslo fáze v případě zemního vodiče se volí 0. U každého vodiče se udává **React/Resis** reaktance/odpor na jeden kilometr délky(Ω/m), **Rout** – vnější poloměr vodiče, poloměr celého vodiče nebo lana(cm), pokud se v předchozí nabídce **Model**

nastaví požadavek Skin efektu, je třeba ještě určit vnitřní poloměr vodiče, poloměr ocelové duše vodiče – lana **Rin** (cm). Další položky popisují uložení a rozmístění jednotlivých fází a zemních vodičů, kde **Horiz** určuje horizontální vzdálenost lana od středu stožáru (m) a **Vtower** je výška lana nad zemí u stožáru (m) a **Vmid** je výška lana nad zemí v místě největšího prověšení (m).[7]



obr.4-11 dialogové okno s nastavením pro vedení, záložka Data

S nastavených obvodových prvků jsem sestrojil obvod pro modelování přechodných dějů při vypínání elektricky blízkého zkratu.



obr.4-12 obvod pro modelování přechodných dějů při vypínání blízkého zkratu

5 Rozbor dosažených hodnot

Po přerušení obvodu vypínačem se síť rozpadne na dva úseky. Na straně zkratu (kontakt vypínače B) je třeba vedení brát jako vedení s rozloženými parametry. Vzniká stojaté vlnění, skládající se z přímé vlny od vypínače a zpětné vlny od místa zkratu. Stojatá vlna má na kontaktu B kmitnu a v místě zkratu uzel a pohybuje se rychlostí $v \approx c$. Napětí v bodě B má pilovitý průběh, který je exponenciálně tlumen. Frekvence pilovitého napětí závisí na vzdálenosti vypínače od místa zkratu.

Ze zadaných rozměrů a hodnot si vypočteme indukčnost a kapacitu vedení:

indukčnost vypočítáme ze vztahu $L_v = 0,46 \cdot \log \frac{a_s}{r} + 0,05$

kde a_s je střední vzdálenost vodičů a r je poloměr vodiče

$$a_s = \sqrt[3]{a_{12} \cdot a_{13} \cdot a_{23}} = \sqrt[3]{175 \cdot 350 \cdot 175} = 220,5 \text{ cm}$$

$$r = 1,565 \text{ cm}$$

po dosazení

$$L_v = 0,46 \cdot \log \frac{220,5}{1,565} + 0,05 = 1,038 \text{ mH}$$

kapacitu spočteme ze vztahu

$$C_v = \frac{0,0242}{\log \frac{a_s}{r}}$$

po dosazení

$$C_v = \frac{0,0242}{\log \frac{220,5}{1,565}} = 0,01126 \mu F$$

Kmitočet pilových kmitů

$$f_0 = \frac{c}{4l} = \frac{299792458}{4 \cdot 10000} = 7494,8 \text{ Hz}$$

kde c je rychlost světla ve vakuu.

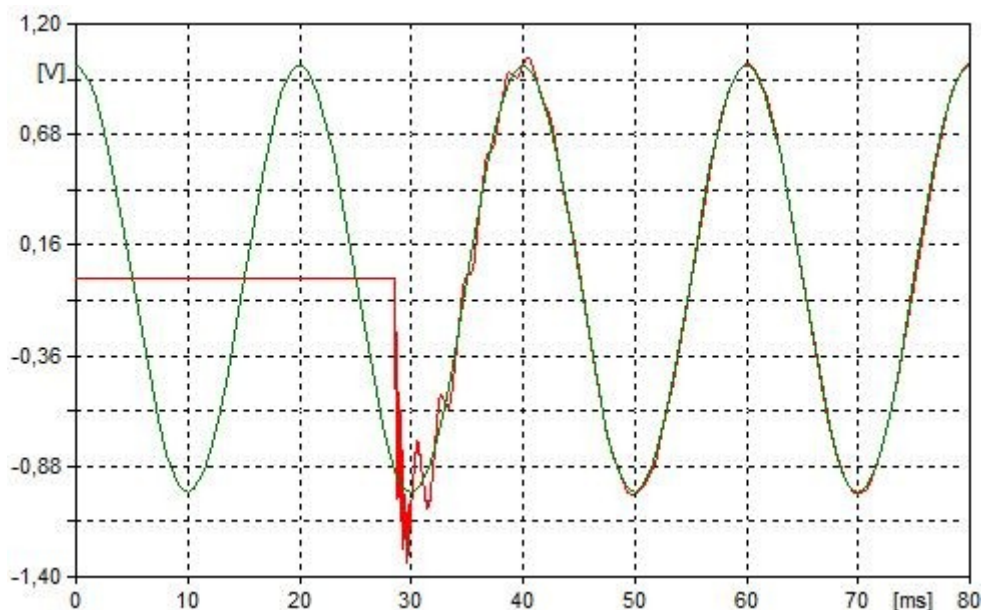
Z kapacity a indukčnosti vypočteme impedanci vedení

$$Z_v = \sqrt{\frac{L_v}{C_v}} = \sqrt{\frac{1,038 \cdot 10^{-3}}{1,126 \cdot 10^{-8}}} = 303,6 \Omega$$

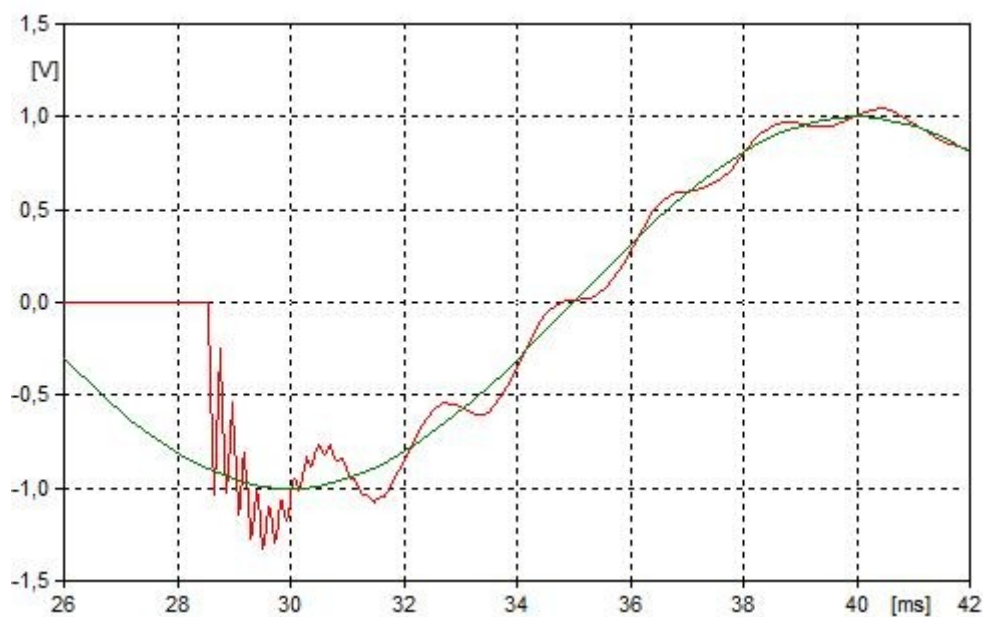
Na straně od zdroje probíhá napětí známým způsobem, na obnovené napětí zdroje je superponována kmitavá složka závislá na konstantách L, C kterou vypočteme ze vztahu

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{10 \cdot 10^{-3} \cdot 10 \cdot 10^{-6}}} = 478,6 \text{ Hz}$$

Výsledný průběh zotaveného napětí je dán rozdílem napětí na obou kontaktech vypínače.



graf 5-1 Průběh napětí na kontaktech vypínače



graf 5-2 Průběh napětí na kontaktech detail

Z grafu jsem odečetl strmost obnoveného napětí $0,022 \text{ V} \cdot \mu\text{s}^{-1}$.

6 Závěr

V mé diplomové práci jsem se zabýval modelováním přechodových dějů při vypínání blízkých zkratů v sítích vvn.

V první části této diplomové práce jsou teoreticky rozebrány přechodové děje v jednoduchých obvodech. Nejprve jsem popsal funkci spínacího přístroje a jeho provozní stavy. Teoretickým popisem přechodných dějů jsem začal u stejnosměrných obvodů, a jako první jsem si zvolil zapínání takového obvodu. Popsal jsem, jak proud v tomto obvodě exponenciálně narůstá až do ustálené hodnoty s časovou konstantou τ . Další případ přechodného děje, který popisují, je při vypínání a mohou nastat dva případy. Oproti zapínání už musíme počítat i s kapacitou vedení. Popsal jsem vliv kapacity při vypnutí a také jaký vliv má na vlastní kmitočet obvodu anebo tlumicí odpor. Teorii přechodných jevů u střídavých obvodů začneme opět u zapínání takového obvodu, kde jsem popsal, jak závisí stejnosměrná přechodová složka na okamžiku sepnutí. Při vypínání střídavých obvodů jsem nastínil všechny možnosti při různých převládajících složkách, jak sériového tak i paralelního řazení.

V další části mé práce jsem popsal zkrat a jeho elektrické důsledky jak pro zdroj, tak i síť. Zkraty se dají rozdělit podle několika kritérií, podle vodivého spojení na dokonalé a nedokonalé, také podle počtu fází na jednofázové a vícefázové. Dalším kritériem je místo zkratu. Podle této podmínky je dělíme na elektricky vzdálený zkrat a blízký zkrat. Definice elektricky blízkého zkratu je popsána v normě ČSN EN 60909. V této kapitole jsem popsal, jak se po rozpojení obvodu vypínačem obvod rozdělí na dvě části a to na část od zdroje k vypínači a od vypínače ke zkratu. Dále jsem rozebral průběh přímé a zpětné vlny napětí od vypínače k místu zkratu. A také jsem popsal průběh napětí, na kontaktu A, které je dáno parametry zdroje a úsekem mezi ním a vypínačem.

V další kapitole začínám historií programu ATP Draw a pro názornou ukázkou práce s programem jsem si zvolil zapínání a vypínání stejnosměrného obvodu. A nyní už se věnuji modelu pro vypínání blízkého zkratu. Model se skládá ze dvou částí. První část se skládá ze zdroje a prvku R, L, C a končí na A kontaktu spínače. Druhá část modelu začíná na B kontaktu spínače a pokračuje modelem vedení. Popsal jsem jednotlivé prvky a možnosti jejich nastavení. Velikost napětí jsem zvolil 1V a to pro zjednodušení a možnost využití prostým vynásobením pro všechny napěťové hladiny.

Tato diplomová práce slouží k teoretickému pochopení přechodových dějů při vypínání blízkých zkratů, ale mohla by najít i praktické využití. Tento model by mohl být podporou projektantům nebo specialistům nákupu, při správné volbě spínače pro možnost odpojení rozvodny od rozvodné sítě.

7 Literatura

- [1] Havelka, O.: *Elektrické přístroje I*. 1.vyd. Praha: SNTL 1985, 440s. ISBN 04-529-85
- [2] Rüdenberg, R.: *Transient performance of electric power systems*. New York 1950
- [3] Zajíč, V.: *Vypínače na vysoké napětí*. 1.vyd. Praha: SNTL 1954, 348 s.
- [4] Vokál, J.: *Výpočty zkratů v technické praxi*. 72 s. 2012
- [5] Koblíček, P.: *Elektrické přístroje*. Ústí nad Labem: Univerzita J.E.Purkyně 2014
- [6] ČSN EN 60 909: 2004 *Zkratové proudy v trojfázových střídavých soustavách*, UNMZ
- [7] www.stanisav-misak.com [Online] <http://www.stanisav-misak.com>
- [8] [www.homen.vsb.cz](http://homen.vsb.cz/~mah30/) [Online] <http://homen.vsb.cz/~mah30/>